

**CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DE LA MODELITZACIÓ I
L'OPTIMITZACIÓ DE L'OPERACIÓ DE PLANTES
QUÍMIQUES MULTIPROPÒSIT DE
FUNCIONAMENT DISCONTINU**

Memòria de Tesi Doctoral

presentada per en

MOISÈS GRAELLS I SOBRÉ

per optar al grau de

Doctor en Ciències Químiques

per la Universitat Politècnica de Catalunya

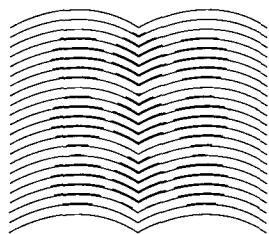
Barcelona, desembre de 1995

Departament d'Enginyeria Química

Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE CATALUNYA



BIBLIOTECA
EX - LIBRIS

**CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DE LA MODELITZACIÓ I
L'OPTIMITZACIÓ DE L'OPERACIÓ DE PLANTES
QUÍMIQUES MULTIPROPÒSIT DE
FUNCIONAMENT DISCONTINU**

Memòria de Tesi Doctoral

presentada per en

MOISÈS GRAELLS I SOBRÉ

per optar al grau de

Doctor en Ciències Químiques

per la Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, desembre de 1995

Departament d'Enginyeria Química

Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

I. AGRAÏMENTS

La realització d'aquesta tesi doctoral no hagués estat possible sense la contribució tan directa com indirecta de moltes persones i institucions. A totes elles vull fer-les-hi constar el meu agraïment:

En primer lloc he d'agrair el suport constant durant tots aquests anys de la meua família, pares, germana i àvia i llur comprensió, confiança i paciència. I també, de manera molt especial les que aquests darrers mesos m'ha dispensat tan afectuosament la Laura.

Aquesta memòria reflecteix la tasca de recerca desenvolupada sota la direcció del Dr. Enginyer Industrial Lluís Puigjaner Corbella. La llibertat i conseqüent responsabilitat per enfrontar la tesi no ha estat exempta de la seva atenció i dedicació. Els seus oportuns comentaris i els encertats suggeriments han determinat el curs del treball. Haig d'agrair-li de la mateixa manera d'haver-me introduït no només en el món de la recerca sinó també en el no menys fàcil de la docència.

He de reconèixer així mateix l'ajut inestimable que des del primer dia i per la seva disposició permanent ha representat el Dr. Antonio Espuña. Els seus consells i la seva capacitat crítica, tan a nivell teòric com pràctic, han estat indispensables per a prosseguir i reeixir en el treball.

També ha augmentat la qualitat del treball el fet d'haver compartit durant tot aquest temps el despatx amb en Gustau Santos i en Josep Corominas. Les discussions, rèpliques i contrarèpliques, han estat una constant i sempre han conduït, després que baixés del burro, a noves i profitoses idees. He d'agrair a la Dra. M^aÀngels Larrayoz, la paciència d'haver-nos aguantat estoicament en molts d'aquests moments.

He de fer constar l'ajuda i especialment la satisfacció que ha representat treballar plegats amb el Jaume Cuxart en el desenvolupament d'algunes de les estratègies que es presenten en aquesta tesi.

També haig d'agrair als informàtics de la casa, en Joaquim Vallès, en Domingo Olmos i n'Aureli Joaniquet, el seu suport per dominar aquestes màquines intransigents i imprescindibles, els ordinadors, quan, en els moments més inoportuns, es rebel·len i es neguen a obehir. Vull fer especial esment de la dedicació del Domingo Olmos en el desenvolupament de la interfície gràfica per a la gestió del programa de càlcul.

Agraïments

Tampoc hi ha dubte que cal agrair a tots els habitants del departament la seva contribució a un ambient cordial i agradable que facilita el treball,... i l'esplai. Gràcies a tots els contertulians de l'hora del cafè per aquests moments tan enriquidors en termes polítics, artístics, esportius... i sovint, certament, també científics. Gràcies també a tots els futbolistes i excursionistes nocturns.

A més de les contribucions personals he d'agrair els imprescindibles mitjans materials que han posat a la meva disposició el Departament d'Enginyeria Química i la Universitat Politècnica de Catalunya.

Vull agrair al Comissionat d'Universitats i Recerca el suport econòmic concedit mitjançant una beca del Programa de Formació d'Investigadors (FI).

Agraeixo també a l'Associació de Becaris de la Politècnica (ABIP) la seva mediació per aconseguir la periodicitat dels pagaments de l'esmentada beca. Gràcies als membres de la Junta pels inoblidables sopars anuals.

Certament, no he omès deliberadament ningú de les moltes persones que m'han facilitat arribar fins aquí. La memòria resulta escassa per tantes ajudes rebudes. No voldria acabar, però, sense agrair al Dr. Joan Bertrán, de la Universitat Autònoma de Barcelona, la confiança d'haver-me adreçat al Dr. Puigjaner.

I també, com tothom, voldria expressar la meva gratitud als qui dec la meva formació. Però de manera especial al professorat de l'IB Pau Vila i molt sincerament a la Carmina, el Paco i la Salut per la seva confiança en les meves possibilitats i el seu suport a la meva carrera.

Evidentment, els errors, qualssevol d'ells, són meus.

II. ÍNDEX GENERAL

I. AGRAÏMENTS	i
II. ÍNDEX GENERAL.....	ii
III. ÍNDEX DE FIGURES	iv
IV. ÍNDEX DE TAULES.....	vi
V. SUMARI.....	vii
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Processos químics discontinus	1
1.1.1. Aspectes generals	3
1.1.2. Importància industrial i econòmica	6
1.1.3. Diferències amb els processos continus.....	9
1.2. Motivació del treball	11
1.2.1. Situació de mercat.....	12
1.2.2. Possibilitats informàtiques.....	14
1.2.3. Investigació operativa	16
1.3. Objectius	18
2. ANTECEDENTS.....	21
2.1. Definicions i classificacions	21
2.2. Optimització combinatoria	31

2.3. Revisió bibliogràfica	38
 3. MODELITZACIÓ	 47
3.1. Seqüenciació i programació	47
3.1.1. Model multiproducte	51
3.1.3. Model multipropòsit	64
3.2. Planificació de la producció	72
3.3. Emmagatzamament intermig	75
 4. OPTIMITZACIÓ	 79
4.1. Mètodes rigorosos	79
4.1.1. Eines disponibles: el paquet GAMS	79
4.1.2. Exemples.....	81
4.1.2.1. Cas multiproducte estricte: EXEMPLE_1	82
4.1.2.2. Model multipropòsit per a un cas multiproducte: EXEMPLE_2.	86
4.1.2.3. Cas multipropòsit: EXEMPLE_3	90
4.2. Mètodes aproximats.....	93
4.2.1. Eines existents: el paquet MOPP	93
4.2.1.1. Nivells de detall. Ordres de fabricació de productes: OFP	94
4.2.1.2. El simulador	96
4.2.1.3. Esquema de solució.....	98
4.2.1.4. Planificació	99
4.2.1.5. El paper de l'usuari	99
4.2.1.6. Consum de serveis generals limitats	100

4.2.2. Ampliació multipropòsit	104
4.2.2.1. Nivells de detall. Ordres de fabricació d'intermedis: OFI	104
4.2.2.2. Simulació d'equips alternatius	106
4.2.2.3. Simulació de dipòsits.....	107
4.2.2.4. Simulació de seqüències d'OFIs	110
4.2.2.5. Estratègia general	111
4.2.2.6. Generació de minirutes.....	116
4.2.2.7. Generació de rutes	122
4.2.2.8. Aparellament	130
4.2.2.9. Purga.....	134
4.2.3. Reordenació i optimització de seqüències d'OFIs.....	134
4.2.3.1. Modificacions manuals.....	135
4.2.3.2. Heurístiques de seqüenciació.....	137
4.2.3.3. Mètodes estocàstics.....	139
 5. VALIDACIÓ.....	 147
5.1. Exemple multiproducte estricte: EXEMPLE_1	147
5.2. Exemple multiproducte amb equips alternatius: ENFASE	149
5.3. Exemple multipropòsit: ESCAPE_4	153
5.4. Exemple multipropòsit: ESCAPE_5	163
5.4.1. Generació de rutes	168
5.4.2. Minimització del temps invertit. Anàlisi estadística.....	170
5.4.3. Programació d'operacions sota comanda.....	181

6. APLICACIÓ INFORMÀTICA	189
6.1. Descripció.....	189
6.2. Estructura del programa	190
6.3. Interfície gràfica d'usuari: necessitat i evolució.....	192
 7. CONCLUSIONS.....	 195
7.1. Avenços	195
7.2. Limitacions.....	198
7.3. Perspectives de futur.....	199
 8. APENDIX.....	 201
8.1. Figures	201
8.2. Taules.....	216
8.3. Nomenclatura	224
8.4. Bibliografia	230

III. ÍNDEX DE FIGURES

1.1	Representació d'un programa d'operacions segons el diagrama de Gantt.....
1.2	Utilització del procés discontinu per diferents sectors.
1.3	Motivacions per a l'ús del procés discontinu.
1.4	Consideració de les necessitats de transferència i emmagatzematge.....
2.2	Temps de cicle limitant per a casos simples.....
2.3	Temps de cicle limitant per una seqüència heterogènia i periòdica.
2.4	Alternatives per a l'ampliació de la capacitat de producció d'un procés discontinu.
2.5a	Polítiques d'emmagatzemament i regles de transferència: UIS.....
2.5b	Polítiques d'emmagatzemament i regles de transferència: ZW.....
2.5c	Polítiques d'emmagatzemament i regles de transferència: NIS.....
2.6	El paper dels dipòsits d'emmagatzemament intermig.
3.1	Descripció de les operacions.....
3.2	Efecte de les subtasques i del temps d'espera TW.
3.3	Informació implícita en el model multiproducte.
3.4	Lligams de precedència entre tasques discontinues i semicontínues.
3.5	Esquema del model multiproducte.
3.6	Tasques amb temps nuls.
3.7	Minimització del <i>makespan</i>
3.8	Indeterminació de la seqüència de productes.....
3.9	Esquema del model multipropòsit.....
4.1	Resultat per l'EXEMPLE_1. El gràfic ampliat és a l'apèndix.
4.2	Model multipropòsit. Cas multiproducte amb ruta única.
4.3	Model multipropòsit. <i>Jobshop</i> amb equips alternatius.....
4.4	Algoritme de simulació de les operacions.....
4.5	Simulació no considerada.

4.6	Enumeració d'esdeveniments seguint el llançament d'OFP.....
4.7	Introducció d'un retard en el programa d'operacions.....
4.8	Esquema general de funcions del MOPP.....
4.9	Violació de les restriccions de serveis.....
4.10	Possibles retards relatius dels dos consums en conflicte.
4.11	Aplicació d'un retard per evitar el pic de consum.....
4.13a	Cascada de retards provocats per la impossibilitat d'espera (ZW) com a conseqüència dels retards inicials.....
4.13b	Les úniques opcions per no fer coincidir en el temps les últimes tasques de cada lot és alterant la seqüència d'esdeveniments.....
4.14	Operació d'un dipòsit en 4 esdeveniments. La primera càrrega va associada a una preparació i la descàrrega a una neteja
4.15	Operació d'un reactor en 4 esdeveniments. La càrrega resultant es processa en 3 minilots.
4.16	Algoritme de simulació multipropòsit.....
4.17	Generació de sis minirutes per a dos productes diferents.....
4.18	Agrupament de minirutes corregides en rutes per a productes acabats.....
4.19	Reordenació de les rutes P1 i P2 per una millor ocupació del temps.....
4.20	Reordenació de les minirutes en una nova ruta P3 (campanya C3).
4.21	Possible operació en mode campanya seguint la ruta P3.....
4.22	Combinacions de capacitat de tres equips. Hi ha set grups possibles.....
4.24	Algoritme d'interrupció de la ramificació.....
4.23	Arbre de combinacions per a l'assignació de grups d'equips a tasques.....
4.25	Esquema del procés de generació de minirutes i dels filtres emprats.....
4.26a	El balanç ($MB_z \cdot NM_z = MB_\zeta \cdot NM_\zeta$) és una condició insuficient.....
4.26b	El balanç ($MB_z \cdot NM_z = MB_\zeta \cdot NM_\zeta$) és una condició insuficient.....
4.27	Algoritme de seqüenciació d'OFIs segons la regla LSL.
4.28	La ruta que fa operar R3 i R4 en fase és més eficient que la ruta que resulta de l'operació simultània de línies independents.

4.30	El resultat segons la regla LSL coincideix amb la solució òptima de temps.....
4.31	La regla SPT (o LPT) provoca l'agrupament de les minirutes d'una mateixa zona.....
4.32	L'agrupament de minirutes pot conduir a resultats favorables en casos concrets.....
4.33a	Descens.....
4.33b	Mostreig.....
4.34	Domini d'una funció de variables contínues.....
4.35	Estratègia SA per a l'optimització d'una seqüència de lots en I x J iteracions
4.36	Estratègia final adoptada.....
5.1	Receptes per als productes de l'exemple ENFASE.
5.2	Representació gràfica del pla de producció proposat.....
5.3	Seqüència de tasques. Els temps d'operació s'indiquen sobre cada tasca.....
5.4	Diagrama del procés i de les possibles rutes de producció.
5.5	Etapas del procés segons l'aproximació de Shah i Pantelides.
5.6	Perfil d'ocupació de l'emmagatzematge.
5.7	Perfil d'ocupació de l'emmagatzematge obtingut.....
5.8	Esquema del diagrama de planta i de les receptes dels productes.....
5.9	Esquema del diagrama de planta i de les receptes dels productes.....
5.10	Distribució observada dels valors de funció objectiu en funció de la temperatura imposada al mostreig.
5.11	Valors esperats del <i>makespan</i> en funció de la temperatura
5.12	Evolució del procediment iteratiu de recuita simulada (SA) vers l'òptim.....
5.13	Desviació dels lliuraments respecte les comandes per als diferents casos. Les escales són diferents.....
5.14	Instants en els quals s'obtenen els minilots de productes finals (lliuraments) representats respecte els instants en els quals es desitjaven (demandes).....
A1	Solució òptima per al problema de seqüenciació de l'EXEMPLE_1.....
A2	Problema sense restriccions. La demanda de mà d'obra és superior a la disponible

A3	El retard de certes operacions resol el conflicte sense alterar el temps total.....
A4	EXEMPLE_1. Seqüència òptima obtinguda emprant recuita simulada (SA).....
A5	La seqüència s'adapta a les restriccions redistribuint els temps d'espera
A6	Retard d'operacions en la seqüència original en reduir-se la limitació de serveis.....
A7	Nova seqüència (SA) d'acord amb les noves restriccions de serveis.
A8	Exemple ESCAPE_4. Pla de producció inicial amb rutes d'un sol producte (1a)
A9	Campanya de productes compatibles CM037.....
A10	Campanya de productes que comparteixen equips no limitants CM043.
A11	Pla de producció amb campanyes multiproducte (1b).....
A12	Inclusió d'operacions de preparació, neteja i transferència (unitats semi- contínues).
A13	Efecte de la consideració de subtasques en el pla de producció (2a).
A14	Ajust de la producció (2a) i posterior inclusió de limitació de serveis (3a abans).....
A15	Retard d'operacions per satisfer les restriccions (3b després).
A16	Exemple ESCAPE_5. Campanyes de productes compatibles.....
A17	Rutes quasi compatibles. Es comparteixen equips no limitants.....
A18	Ruta heterogènia per al producte 3 amb grups d'equips en fase i fora de fase.
A19	Programa inicial per a 5 productes segons la regla LSL.
A20	Reordenació de la seqüència d'OFIs segons la regla SPT (<i>dispatching</i>).....
A21	Reordenació de la seqüència d'OFIs segons la regla LPT (<i>dispatching</i>).....
A22	Solució obtinguda amb el mètode de recuita simulada (SA).....
A23	Ajust de producció i demanda (<i>due-dates</i>) obtingut per recuita simulada (Cas 5).
A24	Aspecte de l'aplicació informàtica l'any 1990.....
A25	Aspecte de l'aplicació informàtica l'any 1993.....
A24	Aspecte de l'aplicació informàtica l'any 1994.....
A25	Reordenació automàtica d'OFIs via recuita simulada (SA, 1995).

IV. ÍNDEX DE TAULES

1.1	Equipament disponible i característiques més significatives.
1.2	Serveis generals disponibles i característiques més significatives.....
1.3	Exemple de recepta per a un hipotètic producte A: seqüència de tasques, unitats possibles per realitzar cada tasca i requeriments de temps i energia.....
1.4	Especificacions de les possibles demandes de serveis generals.
3.1	Exemple de la partició de les receptes dels productes en zones.
4.1	Descripció de demandes i productes.
4.2	Temps de procés TP_{ij} per a les tasques discontinües.
4.3	Temps d'estabilitat per a les tasques discontinües.....
4.4	Dimensions del problema.
4.5	Resultats obtinguts per a l'EXEMPLE_1.
4.6	Solució del problema LP resultant de la relaxació de les variables binàries.
4.7	Solució òptima del problema.....
4.8	Temps de procés TP_{ij} per a l'EXEMPLE_2.....
4.9	Dimensions del problema EXEMPLE_2.....
4.10	Resultats obtinguts per a l'EXEMPLE_1.
4.11	Comparació de les solucions relaxada i final.....
4.12	Dimensions del problema.
4.13	Possibilitats d'assignació d'equips a tasques.....
4.14	Temps de procés per a les diferents assignacions possibles.
4.15	Resultats obtinguts per a l'EXEMPLE_3. La cerca s'ha limitat a 105 s. de càlcul.
4.16	Nivells de detall del simulador multiproducte.....
4.17	Nivells de detall del simulador multipropòsit.
4.18	Número de rutes (minirutes) en funció del número de tasques i d'equips.....
4.19	Possibles valors de relacions enteres per al conjunt \mathcal{R}

4.20	Elecció d'una OFI a l'estat inicial Ψ_0
4.21	Tria d'una posició de destí a l'estat inicial Ψ_0 per a l'OFI elegida.....
4.22	A l'estat final Ψ_1 l'antiga OFI número 7 es llança en segona posició.....
5.1	Distribució multiperíode de la demanda.....
5.2	Relació de tasques, productes i equips.....
5.3	Els resultats de Papagerorgiou i Pantelides.....
5.4	Assignació d'equips a tasques amb una heurística simple.....
5.5	Comprovació de les assignacions mitjançant la regla LSL.
5.6	Escombrat dels factors d'ocupació imposats als equips.
5.7	Rutes obtingudes després de la primera generació i la primera purga.....
5.8	Producció assolida amb les rutes de primera generació.....
5.9	Rutes obtingudes després de la segona generació.
5.10	Producció assolida amb les rutes de segona generació.....
5.11	Comparació dels diferents casos estudiats per a l'exemple ESCAPE_4.....
5.12	Capacitat dels equips discontinus disponibles en unitats de producció. El valor dels factors de capacitat és u en tots els casos.....
5.13	Relació d'equips utilitzables per les tasques de cada producte.....
5.14	Relació de temps de procés TP de les tasques discontinúes i temps d'estabilitat TE dels intermedis corresponents.....
5.15	Dipòsits i polítiques d'emmagatzemament possibles per cada tasca discontinua.....
5.16	Possibles alternatives de producció en funció de l'ocupació dels equips.....
5.17	Rutes homogènies generades amb els factors d'ocupació escollits.....
5.18	Rutes heterogènies obtingudes per aparellament de les homogènies.....
5.19	Característiques de la ruta CM160.....
5.20	Característiques de la ruta CM160 amb les contribucions de cada un dels productes implicats.....
5.21	Temptatives de millora del temps invertit en la ruta CM160.....
5.22	Millores obtingudes per a la ruta CM160 mitjançant SA.....

5.23	Resultat dels diferents mostrejos de l'espai de solucions.....
5.24	Fraccions de casos factibles i casos possibles determinades teòricament per seqüències de minilots d'un sol producte amb un sol intermedi.....
5.25	Fraccions de casos factibles i casos possibles determinades estadísticament per a les rutes de cada producte implicades a CM160.....
5.26	Perfil de demanda objectiu i els diferents punts de partida.....
5.27	Relació de comandes i lliuraments. Òptim desconegut.....
5.28	Relació de comandes i lliuraments. Òptim conegut.....
6.1	Esquema descriptiu de l'aplicació informàtica.....
A1	Exemple ESCAPE_4: generació de les 36 rutes homogènies inicials.....
A2	Rutes obtingudes després de la primera generació i la primera purga.....
A3	Primera generació de rutes heterogènies.....
A4	Millora de les rutes mitjançant recuita simulada (SA).....
A5	Purga del conjunt de rutes millorades de la segona generació.....
A6	Resultats de la generació de rutes homogènies en considerar les subtasques de transferència, preparació i neteja.....
A7	Exemple ESCAPE_5: generació de les 90 rutes homogènies inicials.....
A8	Primera generació de rutes heterogènies.....
A9	Millora de les rutes heterogènies mitjançant recuita simulada (SA).....

V. SUMARI

Aquest treball de tesi s'adreça a la indústria de procés químic d'operació discontinua tot i que també pot resultar profitós per altres situacions de fabricació per lots. Aquests tipus d'indústries són molt variats i s'inclouen en sectors com el de la química fina, el farmacèutic, l'agroalimentari i, en definitiva, l'elaboració d'especialitats. La seva importància econòmica rau tant en el seu significatiu volum de producció com en l'alt valor afegit que sovint tenen els productes.

L'objecte de l'estudi és la gestió dels recursos de fabricació i l'optimització de l'operació de la planta per tal d'ajustar la producció resultant als requeriments de la demanda. La natura discontinua i dinàmica dels processos que hi tenen lloc reclama la presa de decisions en termes d'assignació de tasques a equips (reactors, filtres i altres aparells), de seqüenciació de productes i temporització de les operacions. Es tracta, doncs, d'un problema de programació d'activitats.

El primer pas vers la solució d'aquest problema és la modelització del sistema estudiat. Aquest treball proposa un model d'operació detallat que inclou, a més de la compartició per part dels diferents productes de recursos generals (temps, equips, serveis...), aspectes més específics de la indústria química. Són les necessitats de transferència i emmagatzamatge de productes, tant intermedis com acabats, de natura molt probablement fluïda. I són també, les tasques de preparació i neteja que, depenent de la seqüència de productes, cal aplicar als equips emprats.

La modelització de l'emmagatzemament també considera la possible inestabilitat de certs intermedis i la conseqüent limitació de l'espera abans de ser processats. De fet, la modelització incorpora un nou esquema conceptual que permet la segmentació de les receptes dels diferents productes en sèries de tasques lligades als intermedis estables. Llavors, la descripció d'un programa d'operacions complex mitjançant una sèrie d'ordres de fabricació d'aquests intermedis proporciona una notable simplificació del problema que redueix el número de restriccions a considerar i facilita el procediment d'optimització.

L'optimització mitjançant mètodes rigorosos ja establerts només resulta indicada per problemes molt simples en comparació amb el que es planteja en aquest treball. És per això que s'ha desenvolupat una metodologia heurística general que permet abordar aquest problema patró sota les diferents circumstàncies de cada cas particular. En una primera part es procedeix a la generació d'alternatives de producció considerant els casos possibles i

eliminant els ineficients sota una sèrie de criteris preestablerts. Aquestes alternatives s'expressen com seqüències de fabricació d'intermedis estables i posteriorment poden ser millorades sota diferents objectius bé manualment o bé emprant mètodes sistemàtics.

La validació de la metodologia proposada és possible gràcies a la comparació amb casos de la literatura. En proposar exemples de major complexitat, la utilització de mètodes estocàstics es demostra molt eficient per resoldre problemes per als quals és difícil trobar regles de solució. Llavors, la validació d'aquest casos és possible estadísticament.

En conclusió, d'aquest treball en resulta una metodologia general i flexible que s'adapta a la majoria de característiques d'un tipus de problemes que, de moment i en última instància, han de ser resolts de manera particular. La seva complexitat continua reclamant la nostra intuïció.

INTRODUCCIÓ

1. INTRODUCCIÓ

La indústria química és aquella dedicada als processos de transformació o separació de matèries primeres en compostos útils. Si bé aquesta definició ens adreça a l'origen de la història, on sorgeixen els primers procediments d'obtenció de metalls i altres derivats minerals i vegetals, el naixement de la indústria química moderna, però, se situa entre finals del segle XVIII i els inicis del segle XIX. És durant la revolució industrial quan l'aplicació del coneixement i el mètode científics originen una Enginyeria Química capaç de concebre i executar processos productius de complexitat tecnològica cada vegada més gran.

El *súmmum* d'aquesta indústria ha estat la consecució de plantes de procés continu* per a la fabricació ininterrompuda d'un o d'uns pocs productes específics (i alguns subproductes derivats) en condicions d'operació òptimes. Els subsegüents increments de la productivitat i la rendibilitat dels processos han permès l'abaratiment de molts productes químics que avui en dia cal considerar bàsics per a la societat i l'economia dels països, els quals potencien llur pròpia indústria química com a indústria estratègica i de xoc.

Tanmateix, la societat actual es caracteritza no tan sols per l'abundància d'uns centenars de productes químics bàsics sinó, i sobretot, per la gran diversitat de productes químics comercialitzats, la majoria dels quals s'obtenen mitjançant processos productius discontinus. Són aquests processos l'objecte d'aquesta tesi.

1.1 Processos químics discontinus.

En els processos químics de producció discontinua s'obtenen quantitats discretes de productes finals que anomenem lots (*batch*) després que les proporcions adequades de matèries primeres hagin seguit una seqüència ben definida de transformacions.

Aquestes transformacions o tasques requereixen un cert temps i han de ser dutes a terme en unitats de producció específiques sota unes condicions d'operació (temperatura, pressió,

* Històricament, el procés continu és un important avenç que adopten diferents indústries europees durant la segona dècada del segle XIX per a producció de l'àcid sulfúric, molt poc temps després, en termes relatius, de l'inici de la seva elaboració industrial (Newcastle, 1746). La fabricació d'aquest producte patró a Catalunya s'esdevindria amb notable posterioritat (Barcelona, 1846).

etc.) determinades. Tota la informació necessària per convertir les matèries primeres en un producte final concret constitueix la recepta d'aquest producte. Una manera convenient de representar la fabricació dels diferents lots de productes és mitjançant el diagrama de Gantt (*Gantt chart*). El diagrama de Gantt (Fig. 1.1) és un gràfic prou intuïtiu on es representen les diverses utilitzacions de les unitats de procés al llarg del temps (Baker, 1974).

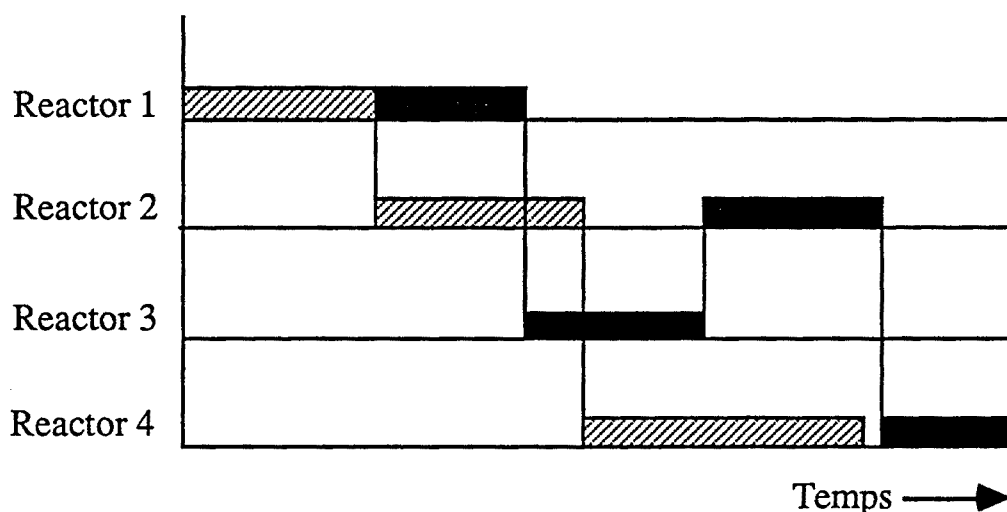


Fig. 1.1. Representació d'un programa d'operacions segons el diagrama de Gantt.

L'estat dels processos químics de producció discontinua canvia constantment en el temps: es tracta, per tant, de processos no estacionaris. Això és així tant pel que fa a les variables d'operació durant el transcurs d'una determinada transformació com pels diferents tipus de transformacions que poden anar tenint lloc, successivament, en una mateixa unitat de producció.

En el primer cas, cada una de les transformacions que tenen lloc en un recipient concret constitueix un sistema que evoluciona en el temps sota lleis físiques i químiques conegudes i atenent les condicions externes imposades (escalfament, agitació, etc.). La correcta operació de cada una de les tasques, el seguiment d'aquesta evolució i l'ajust de les condicions externes per tal d'assolir i mantenir les especificacions de la recepta, constitueix per sí sol tot un camp d'estudi i recerca: el control de processos discontinus, el qual no s'atendrà en aquest treball.

El segon cas comporta una anàlisi a un nivell de detall superior. El conjunt de transformacions (per a diferents productes) que tenen lloc en cada una de les diferents unitats de producció canvia, sota certes restriccions tècniques, seguint la voluntat de les persones responsables del procés. En els processos discontinus cada transformació s'inicia, dura un cert temps i finalitza, i seguidament cal una decisió sobre què fer a continuació. La determinació del conjunt de les millors decisions a prendre per assolir els objectius de

fabricació és l'altre gran problema dels processos discontinus i el que constituirà l'objectiu d'aquest estudi.

Aquest és un problema d'optimització que rep el nom de planificació de la producció (*planning*) quan es fa referència a l'establiment de les disposicions de caràcter general que dirigiran l'operació de la planta a mig o llarg termini i programació (*scheduling*) quan es tracta de la determinació precisa dels temps en els quals s'iniciaran cada una de les operacions i dels equips on es realitzaran.

1.1.1 Aspectes generals.

El conjunt de les millors decisions ha d'ésser compatible amb totes les restriccions tècniques que imposa la limitació dels recursos de la planta en qüestió. Una altra possible manera d'enunciar el problema de l'optimització de l'operació dels processos químics discontinus és com la cerca del millor aprofitament i distribució al llarg del temps dels recursos disponibles per a la fabricació de diferents quantitats de diferents productes finals i, eventualment, altres productes intermedis.

D'entre els recursos disponibles en una planta química, com en qualsevol instal·lació productiva, evidentment i implícita, el temps n'és un de fonamental. S'anomena horitzó de temps al conjunt d'hores, dies o setmanes, del qual es disposa per tal d'assolir uns determinats nivells de producció. Aquest horitzó de temps, però, pot definir-se simplement com un número d'hores de treball o bé s'haurà d'ajustar a un calendari laboral que contempli des de parades de planta (totals o parcials) per raons de manteniment fins a les festes locals. La producció haurà de satisfer una estimació de demanda a llarg termini però també cal que compleixi amb unes comandes amb dates de lliurament concretes.

El recurs material més obvi és el conjunt d'unitats de producció, altrament anomenades màquines, aparells o, més comunament en la indústria química, equips. Els equips contenen uns productes intermedis o semielaborats mentre s'executa una tasca i n'esdevenen uns altres. També són necessàries, però, unitats de transferència que permetin el transport dels productes semielaborats des d'una unitat de producció a una altra, on es durà a terme la següent tasca de la seqüència que mena cap al producte final. Així mateix són igualment possibles les unitats o equips que simultàniament produeixen i transfereixen, i també les que ni produeixen ni transfereixen i només emmagatzemen.

Al referir-se a l'operació de la planta es diferencien dos grans tipus d'equips: aquells que són pròpiament discontinus i treballen de forma no estacionària entre l'inici i el final del procés

que realitzen i aquells que de fet són continus i que treballen de forma estacionària durant certs intervals de temps entre diferents tasques discontinües (assecadors, filtres, etc, i les bombes o canonades que són exclusivament unitats de transferència). A la taula 1.1 es detallen les unitats disponibles (m) i es classifiquen segons els diferents tipus d'equips.

Taula 1.1. Equipament disponible i característiques més significatives.

Equipament disponible		Capacitat		Tipus
Unitats	m	V_m (m ³)	R_m (m ³ /s)	
RX_Z01	1	5,0	-	Reactor agitat i encamisat
RX_Z02	2	5,0	-	Reactor agitat i encamisat
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
RX_P10	10	4,0	-	Reactor polimerització
RX_P11	11	4,0	-	Reactor polimerització
RX_P12	12	3,0	-	Reactor polimerització
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
CD_1	21	4,0	-	Columna destil.lació
CD_2	22	6,0	-	Columna destil.lació
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
BOMBA_1	27	-	0,004	Bomba centrífuga
BOMBA_2	28	-	0,004	Bomba centrífuga
BOMBA_3	29	-	0,012	Bomba
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FR_1	35	-	0,0014	Filtre rotatori
FR_2	36	-	0,0014	Filtre rotatori
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TANC_A	42	20	-	Dipòsit d'emmagatzematge
TANC_B	43	30	-	Dipòsit d'emmagatzematge

Els equips dels quals disposa una planta no constitueixen l'únic recurs necessari per a la fabricació dels productes. Les matèries primeres representen un altre recurs essencial. Llur disponibilitat en un moment determinat permet o no l'inici d'una tasca. Altrament la previsió d'aquest inici possibilita una confecció acurada de les comandes de compra als proveïdors.

Taula 1.2. Serveis generals disponibles i característiques més significatives.

Servei general	Tipus	Limitacions	Disponibilitat	Cost
Mà d'obra	Operació	45 operaris	6-22 h.	4 \$/h
	Supervisió	12 operaris	0-24 h.	7 \$/h
	Manteniment	5 operaris	8-16 h.	6 \$/h
Vapor	BP, 4000 kPa	30 kg/s	0-24 h.	0,025 \$/Kwh
	MP, 1500 kPa	30 kg/s	0-24 h.	0,030 \$/Kwh
	AP, 300 kPa	25 kg/s	0-24 h.	0,035 \$/Kwh
Electricitat	Xarxa	600 kW	0-24 h.	0,1 \$/Kwh
	Cogeneració	250 kW	0-24 h.	0,07 \$/Kwh
Aigua	Xarxa	2 m ³ /s	0-24 h.	0,40 \$/m ³
	Circuit intern	1 m ³ /s	0-24 h.	0,08 \$/m ³
Aire comprimit	300 kPa	20 kg/s	0-24 h.	0,01 \$/kg

Taula 1.3. Exemple de recepta per a un hipotètic producte A: seqüència de tasques, unitats possibles per realitzar cada tasca i requeriments de temps i energia.

PRODUCTE A					
Tasca	Equips possibles	Estabilitat (h) intermedis	Cost (\$/h) associat	Temps de procés (h)	Demandes de serveis (n)
Càrrega	BOMBA_1	∞	1	0,15	1
	BOMBA_2	∞	1	0,15	2
Reacció	RX_P12	2,5	12	7,5	3,4,5
	RX_P13	2,5	12	7,5	6,7,8
	RX_P17	1,0	20	9,0	9,10,11
Transvasmt.	BOMBA_3	∞	3	0,25	12
Destil·lació	CD_1	∞	35	1,5	13,14
	CD_2	∞	35	1,5	15,16
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Els serveis generals de la planta també són un recurs limitat. S'entenen com a tals totes les formes disponibles de subministrament d'energia (electricitat, vapor, mà d'obra, etc.) que possibiliten el manteniment de les condicions d'operació (agitació, temperatura, pressió,...) i de la seqüència de tasques a realitzar (càrrega, descàrrega,...). La disponibilitat de cada un d'aquests serveis en cada moment està limitada a la màxima potència elèctrica contractada, a la capacitat del generador de vapor, al número d'operaris en plantilla, etc. A la taula 1.2 es presenta una relació de diferents serveis generals.

Taula 1.4. Especificacions de les possibles demandes de serveis generals.

n	Producte	Tasca	Subtasca	Unitat	Servei	Demanda
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	A	Càrrega	Operació	BOMBA_1	Electricitat	2000 kW
14	A	Càrrega	Operació	BOMBA_2	Electricitat	2000 kW
15	A	Polim.	Operació	RX_P12	Electricitat	2500 kW
16	A	Polim.	Neteja	RX_P12	Mà d'obra	2 operaris
17	A	Polim.	Neteja	RX_P12	Aigua	0,12 m ³
18	A	Polim.	Operació	RX_P13	Electricitat	3000 kW
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Totes les necessitats d'aquests recursos cal incloure-les en la recepta de cada producte tal i com s'exemplifica a la taula 1.3. La capacitat d'emmagatzematge, tant de productes intermedis com de productes finals (*stock*), també és un recurs limitat que caldrà especificar. En definitiva, doncs, els que s'han exposat fins aquí són els trets generals que configuren el problema de l'optimització del funcionament d'una planta química de procés discontinu.

1.1.2. Importància industrial i econòmica.

L'interès d'aquest estudi va lligat a l'interès que desperta el procés discontinu en el món de la indústria química. Si bé aquest tipus de procés és més característic del sectors de la Química Fina i Especialitats, sovint associats a volums de producció reduïts, aquesta visió seria parcial i incompleta. La fabricació discontinua també és utilitzada per elevades quantitats de producció (e.g. indústria agroalimentària). L'any 1979, el treball precursor de Mauderli i

Rippin ja posava de manifest l'abast del mode de producció discontinu a l'assenyalar que implicava un 60% de la producció química mundial.

Un treball més recent (Hasebe i Hashimoto, 1992) difon dades corresponents a la indústria química japonesa totalment extrapolables. És interessant la distribució dels sectors que utilitzen procediments de fabricació discontinus que es mostra a la figura 1.2. Tanmateix, és molt més significatiu que només un 18% de la mostra d'indústries estudiada estigués considerant la possibilitat de renunciar al procés discontinu en favor del continu.

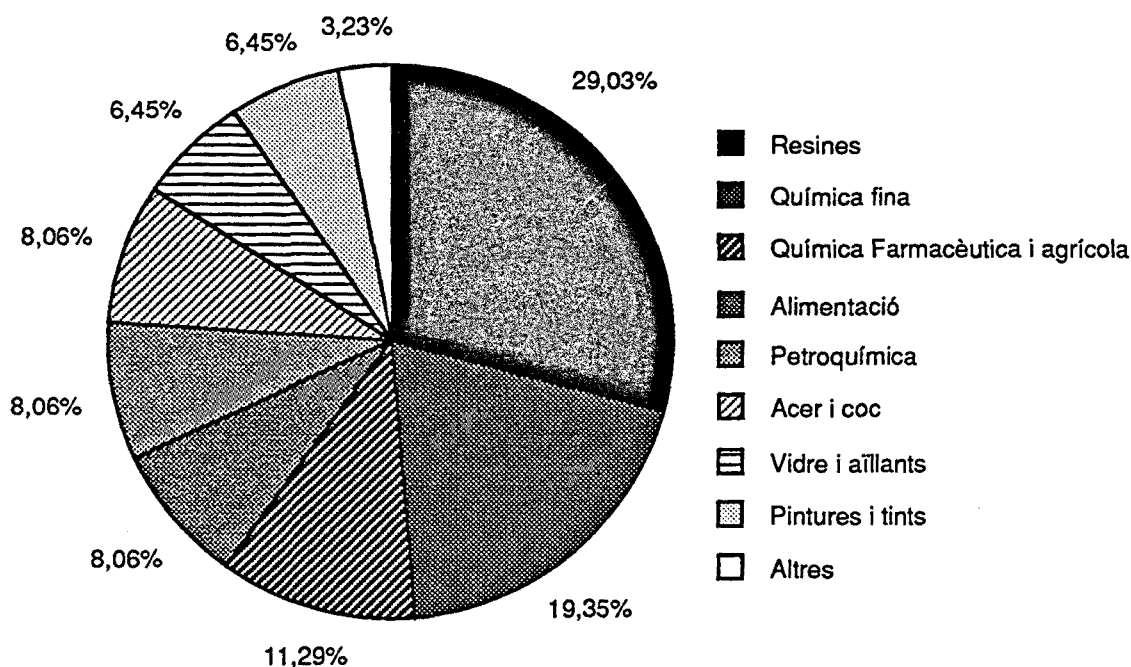


Fig. 1.2. Utilització del procés discontinu per diferents sectors.

Aquestes dades demostren que no és encertat considerar el procés discontinu com una solució transitòria en l'evolució vers el procés continu; ans al contrari, existeixen motius concrets, la importància dels quals es posa de relleu a la figura 1.3, que justifiquen la seva elecció com a solució de problemàtiques concretes.

En les raons de mercat és on s'observen més coincidències. La possibilitat de produir múltiples productes d'alta qualitat és el motiu de més pes. La demanda d'aquests productes es caracteritza, en general, per una gran variabilitat i per ser, a nivell individual, insuficient per permetre la rendibilitat d'una planta de fabricació exclusiva. El subministrament de les matèries primeres pot resultar igualment canviant tant pel què fa a la quantitat com a la qualitat.

En un sentit més ampli es parla de la flexibilitat d'aquest tipus de plantes al referir-se a la capacitat d'aprofitar unes mateixes instal·lacions per a satisfer la demanda de molts productes diferents però que poden ésser essencialment similars. També es fa referència a la flexibilitat

al destacar la facilitat de remodelació (*retrofitting*) de les instal·lacions, mitjançant l'adequada incorporació de nous equips, per tal d'adaptar-les als canvis del mercat.

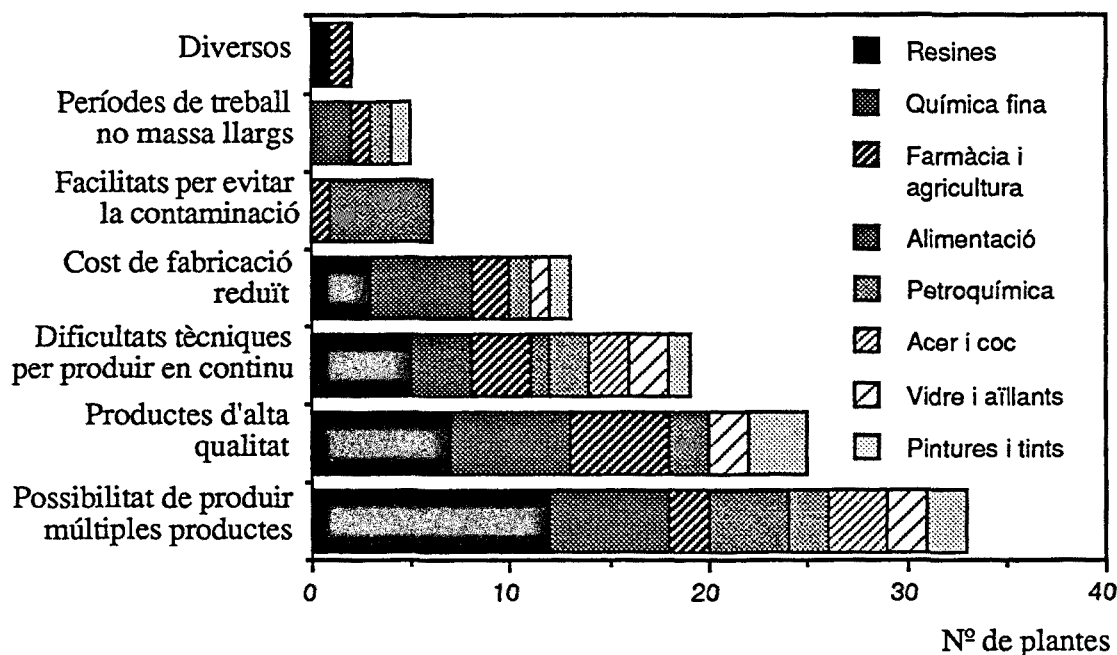


Fig. 1.3. Motivacions per a l'ús del procés discontinu.

Quant a les raons tècniques que motiven el processament per lots cal remarcar en primer lloc la dificultat de la recepta d'alguns productes. Compostos que necessiten processos de síntesi complexos, amb moltes etapes, diferents separacions i el conseqüent baix rendiment degut a les pèrdues, esdevenen productes cars i de demanda limitada i són clars candidats a ser produïts de forma discontinua*.

Etapes de procés amb temps de reacció molt grans que implicarien, de treballar en continu, reactors de gran volum provoquen també l'elecció del processament per lots. Aquest és el cas, per exemple, de fermentacions i maceracions, processos típicament discontinus, que es porten a terme en grans tancs durant períodes de temps de l'ordre de dies. Així mateix, processos en els quals intervenen sòlids o pastes es realitzen sovint de manera discontinua degut a les dificultats de transport i dosificació implicades.

Cal assenyalar també la dificultat de l'automatització d'aquests processos de fabricació els quals, en molts casos, són fortament dependents d'una mà d'obra especialitzada que pot arribar a conferir un caire artesanal al procés. D'aquí se'n deriva, juntament amb la natura dinàmica que els hi és intrínseca, que els índexs de sinistralitat dels processos químics discontinus siguin més elevats que els dels continus (Rasmussen, 1987; Casal et al. 1995).

* No és en va, certament, el notable esforç que dedica la química a la cerca de processos de síntesi amb el mínim nombre de passos (fins a set reactius mesclats en una sola etapa, Dömling i Ugi, 1993).

Els avantatges inherents al procés discontinu, però, fan previsible el manteniment del seu interès per part de la indústria química. El seu futur va lligat a la recerca que es realitza en aquest camp que, tant a nivell industrial com acadèmic, és realment prometedora i tecnològicament innovadora.

Així és, tant pel que fa a l'optimització dels processos com per les novetats conceptuals que es proposen: automatització i integració en entorns computeritzats (CIM, *Computer Integrated Manufacturing*, Puigjaner et al., 1991, CAPE/CIPE, *Computer Aided Integrated Process Engineering*, Benson, 1992), integració energètica i minimització de residus (Corominas et al., 1993 i Grau et al., 1993), utilització d'equips mòbils per a la supressió de les canonades (*Pipeless Plants*, Niwa, 1993), etc.

1.1.3. Diferències amb els processos continus.

La indústria química de procés continu i la de producció per lots (CPI i BCPI, *Chemical Process Industries* i *Batch Chemical Process Industries*) representen solucions diferents a problemes diferents i es reparteixen sectors de mercat propis. L'anàlisi de les característiques i les problemàtiques de cada una d'elles i les consideracions de les diferències permet establir les causes de l'estat actual dels mètodes d'optimització de l'operació dels processos discontinus.

Processos Continus

- Fabriquen pocs productes i subproductes.
- La demanda dels productes és molt elevada i poc variable.
- El subministrament de matèries primeres és usualment molt regular.
- El marge de benefici és reduït.
- Els beneficis s'obtenen amb una producció elevada i estable a cost mínim.
- Es tracta de processos que segueixen una operació en estat estacionari.
- Existeixen eines informàtiques comercials de simulació i optimització.

L'optimització de l'operació dels processos continus suposa la determinació de les condicions d'operació que possibiliten la màxima producció amb un cost mínim. Al tractar-se d'un procés en estat estacionari, aquestes condicions són vàlides per a qualsevol instant de

Introducció

temps i es fixen com a punts de consigna a mantenir constantment. Qualsevol desviació d'aquests valors suposarà un cost addicional que esdevé màxim en les parades i arrancades de la planta.

L'optimització implica la resolució de sistemes d'equacions algebraiques no lineals de variables contínues i independents del temps, derivades de models estacionaris abastament estudiats. Tant l'estandarització dels models implicats com la complexitat matemàtica derivada estan a l'abast dels equips informàtics actualment disponibles (maquinari o *hardware*) i possibiliten el desenvolupament de programands (*software*) que portin a terme automàticament metodologies de simulació i optimització dels processos químics continus.

Els beneficis indiscutibles que l'existència d'aquestes eines suposen per a la indústria són els responsables que aquestes eines hagin esdevingut una realitat comercialitzada des dels anys 70 (*PROCESS*TM i *PRO/II*TM de SimSci, *MAX*TM i *SPEEDUP*TM d'AspenTech, *HYSIM*TM i *HYSIS*TM de Hyprotech...).

Processos Discontinus

- Fabriquen múltiples productes i accepten productes nous.
- La demanda dels productes pot ser variable i incerta.
- Les matèries primeres són variables quan a oferta de mercat i qualitat.
- Són productes d'alt valor afegit.
- Els beneficis depenen essencialment de la flexibilitat de la capacitat de producció davant les fluctuacions del mercat.
- Es tracta de processos dinàmics.
- No existeixen eines informàtiques estàndard de simulació i optimització accessibles a la indústria.

Els processos discontinus, en canvi, presenten la seves dificultats al ser processos dinàmics. En primer lloc, encara no es disposa d'una modelització generalitzada de les operacions individuals que permeti conèixer la manera com evolucionen les variables d'operació (pressió, temperatura, composició...) en funció del temps. Casos particulars, com ara fermentadors i cristallitzadors, són processos encara poc coneguts que continuen oferint resistència a la modelització (Ponton, 1992). La destil·lació per lots presenta encara problemes de resolució (Diwekar, 1994; Bosley i Edgar, 1994; Melhorn et al, 1996).

Tanmateix, aquest és un problema que passa a segon terme quan es parla de l'operació del conjunt de la planta. La determinació del conjunt de decisions a prendre en cada instant que demana l'optimització del procés discontinu implica treballar amb extensos conjunts de variables binàries (si/no) i les funcions discontinues que les contenen.

Actualment, els mètodes matemàtics desenvolupats per a la resolució rigorosa d'aquests tipus de problemes permeten abordar l'optimització de l'operació de les plantes químiques de funcionament discontinu només de manera parcial i admetent grans simplificacions. La combinatòria de decisions implicada fa que l'anàlisi de les possibilitats no estigui a l'abast dels ordinadors de què raonablement disposen les empreses.

A més, per a les plantes de funcionament continu és profitós de dedicar temps a la cerca de la seva operació òptima atesa la seva validesa a llarg termini. Tanmateix, per a les plantes de funcionament discontinu, això pot esdevenir un esforç estèril si aquesta solució no es pot obtenir ràpidament cada vegada que canvien les condicions de mercat o, fins i tot, que es reben noves comandes.

En definitiva, les BCPI necessitarien mètodes de simulació i optimització dels processos que, un cop programats i implementats en un ordinador, esdevinguessin una eina robusta i flexible per al treball rutinari.

Si bé són evidents els avantatges que la utilització d'un sistema d'aquestes característiques representaria quan a la millora de l'aprofitament dels recursos disponibles, el fet és que, fins ara, la indústria havia pogut assimilar perfectament la baixa productivitat obtinguda amb l'ús de mètodes de planificació manuals (fortament basats en l'experiència i la intuïció) ja que aquesta s'havia vist compensada amb escreix pels amplis marges de benefici disponibles fins no fa gaire temps.

És per tot això que la metodologia per a l'optimització de l'operació de les plantes químiques de funcionament discontinu ha estat restringida fins fa poc a l'àmbit exclusivament acadèmic i conseqüentment encara no es comercialitza *software* per a aquest propòsit.

1.2. Motivació del treball.

Durant els darrers quinze anys s'ha enregistrat un espectacular increment de l'interès, la recerca i les publicacions en el camp de la planificació de la producció i la programació d'operacions adreçades a la indústria química. El treball que es presenta s'inscriu en aquesta

important línia de recerca dins l'enginyeria de processos que és la programació d'operacions discontinües (*Scheduling of batch operations*).

L'interès d'aquest tipus d'estudis rau en l'interès que han despertat darrerament, malgrat no constituir cap novetat tecnològica, els processos químics de funcionament discontinu (les BCPI). La necessitat d'una ràpida adaptació dels processos de producció a les actuals exigències d'un mercat canviant i incert (les característiques del qual es comentaran més endavant) potencien les BCPI a causa de llur inherent flexibilitat.

Tanmateix, el seu aprofitament màxim no és possible sense l'adequada gestió de la producció i de l'operació de la planta. És així, doncs, que ha quedat palesa la necessitat de consolidar metodologies i estratègies que permetin sistematitzar la presa de les millors decisions de gestió. La sistematització d'aquest procés d'optimització ha de conduir, finalment, a la concreció d'aquests sistemes en eines ràpides i robustes aptes per al treball diari a planta (*software*).

No és possible de reeixir en aquesta tasca sense comptar amb les possibilitats que ofereix actualment la informàtica, tant pel que fa al càlcul com pel que fa al maneig interactiu de dades i resultats (finestres, menús, gràfics, ús del ratolí *-mouse*). D'altra banda, ha estat precisament la revolució experimentada per la informàtica el que ha permès abordar uns problemes que fins ara eren intractables degut, sobretot, a la gran complexitat combinatòria involucrada.

L'impuls definitiu experimentat per la recerca en aquest camp ha vingut provocat tant per les necessitats econòmiques com per les possibilitats informàtiques. Així ha estat possible, doncs, atendre el buit que constituïa la modelització i programació d'operacions discontinües en la indústria de procés dins una disciplina ja clàssica com la investigació operativa.

També cal remarcar el reconeixement final que ha obtingut el vessant mediambiental de la gestió dels recursos de la planta, en darrer lloc recursos naturals limitats, tant pel que fa a un millor aprofitament de l'energia i les matèries primeres a transformar com de la subsegüent generació de residus i subproductes.

1.2.1 Situació de mercat.

Ja han estat comentats els trets generals del tipus de mercat al qual s'adrecen les BCPI: demanda en general reduïda i variabilitat tant en la demanda com en el subministrament de matèries primeres. Tanmateix, això no havia representat mai cap problema per a les empreses

del sector que, degut al gran valor afegit dels productes elaborats, es podien permetre la infrautilització de les instal·lacions productives derivada d'una gestió ineficient però suficientment satisfactòria.

Actualment, però, una competència molt més aferrissada força moltes empreses no tant sols a reduir aquests marges de beneficis sinó i, sobretot, a cercar fórmules de gestió de la planta i de la producció que permetin aquestes empreses adaptar-se i àdhuc avançar-se a les necessitats d'un mercat cada vegada més exigent. Tant és així, que la competitivitat només es pot mantenir mitjançant una gestió de la producció que garanteixi la presència dels productes en el mercat en el moment oportú.

La variabilitat de les oportunitats de producció va lligada a les diferents situacions que es poden presentar en:

- Demanda
- Oferta
- Estoc (*stock*)

Quant a la demanda cal tenir en compte no només la variabilitat sinó també la incertesa que sovint l'acompanya. Una demanda estacional permet fer previsions més o menys fiables d'una temporada per una altra però que poden estar subjectes a fluctuacions importants a les quals cal fer front en el seu moment (per exemple, l'efecte dels canvis meteorològics sobre les vendes que ha de suportar la indústria cervesera).

Altrament, una demanda perfectament determinada, com en el cas de treballar sota comanda, sempre estarà sotmesa a les variacions d'última hora que representen les inevitables comandes urgents dels clients més importants. En qualsevol cas, la programació d'operacions no pot consistir exclusivament en l'emissió d'ordres de producció coincidents amb les comandes rebudes: existeixen criteris tècnics que cal observar per garantir uns nivells de productivitat i qualitat acceptables (per exemple, la seqüenciació de lots en la fabricació de colorants o pigments).

La demanda fins i tot pot arribar a afectar la recepta en aquelles situacions en les quals les empreses, per motius diversos, accepten confeccionar productes a mida de les necessitats dels clients.

Per la seva part, l'oferta també pot estar subordinada a canvis notables provocats per les estratègies de marketing de les empreses encaminades a captar nous clients i/o obrir nous mercats mitjançant nous productes. En principi, a no ser que posteriorment es consolidin en el mercat, aquests són productes de vida curta lligats a modes o a l'aparició de

desenvolupaments ulteriors que els substitueixin (per exemple, en la indústria farmacèutica on cal començar a produir les noves especialitats fins i tot abans que les antigues hagin assolit el seu màxim de vendes o en la qual es possible estar a l'espera d'una autorització administrativa per començar a produir immediatament i intensiva un nou fàrmac).

Finalment, quan a l'estoc, cal tenir en compte, no tant sols les noves tendències conduents a la seva reducció sistemàtica (JIT, *Just In Time*) com a mesures d'optimització de costos, sinó les restriccions tècniques derivades de la pròpia natura dels productes que cal respectar (per exemple, la data de consum preferencial i de caducitat en la indústria alimentària).

És precisament per la gran diversitat de situacions esmentades que la necessitat de sistemes ràpids i assequibles per a la gestió racional de la capacitat de producció esdevé vital per a la indústria química de processament per lots.

1.2.2. Possibilitats informàtiques.

L'evolució de l'enginyeria de processos assistida per ordinador, CAPE (*computer aided process engineering*), no ha estat paral·lela a l'espectacular avenç experimentat per la tecnologia de la informació. Benson (1992) entén la CAPE com la integració de la modelització, el disseny, el control, l'operació i seguretat dels processos en un sol entorn informàtic global que esdevindrà essencial per a la supervivència de les indústries de procés en un futur immediat.

Tanmateix, en el mateix article, tot repassant una dilatada experiència industrial dedicada a l'enginyeria de processos químics, reconeix que la CAPE no ha assolit les expectatives d'aquells que foren testimonis del seu naixement a mitjans de la dècada dels 60. Les comparacions amb els èxits assolits pels CAD/CAE (*Computer aided design* i *Computer aided engineering*) en la indústria automobilística i aeronàutica esdevenen inevitables.

Fent referència concreta a les BCPI, la situació resulta decebedora ja de bell antuvi degut a la manca de la concepció sistemàtica d'aquests processos que és necessària i prèvia a qualsevol intent per programar rutines per a la seva gestió. Ponton (1992), tot i el treball recent de Kondili et al. (1988) en aquest aspecte, lamenta la inexistència d'una eina eficient per a la representació dels processos discontinus tal i com es disposa del diagrama de flux (*flowsheet*) en el cas dels processos continus. Encara no han estat consolidats ni models ni metodologies prou generals per uns problemes que sempre semblen extremadament particulars.

Amb retard respecte la indústria de fabricació de peces discretes (mecànica, electrònica,...), la indústria química ha començat a dirigir la seva atenció a la programació d'operacions assistida per ordinador ben entrada la dècada dels anys 70, llevada l'excepció dels mètodes de programació linial desenvolupats durant els anys 50 per a l'optimització de la distribució de les diferents fraccions del refinat de petroli.

La implementació de les tecnologies de la informació ha posat a l'abast dels responsables de la producció una gran quantitat de dades. Els actuals sistemes d'automatització i informació *on-line* de les plantes i les bases de dades permeten informes immediats de l'estat de la planta i dels equips i de les comandes dels clients, els nivells d'inventari, les ordres de fabricació, etc.

Reklaitis (1992), fa referència als entorns CIM en els quals es mou actualment la manufactura de peces discretes quan reclama la utilització de tota aquesta informació disponible per a la presa de decisions òptimes i trasllada el problema de la gestió des del nivell dels sistemes de control d'unitats individuals cap un nivell de supervisió i control de la totalitat de la planta i la programació de les seves operacions.

Hasebe i Hashimoto (1992) revelen que el 1981 només un 25% de les BCPI japoneses emprava algun tipus de tècnica matemàtica per a la planificació setmanal o mensual. Una altra quarta part s'ajudava dels diagrames de Gantt i en la meitat aquesta feina s'efectuava a mà gràcies a l'experiència dels responsables de la planta. La situació ha hagut de canviar dràsticament durant l'última dècada. Però la programació d'operacions en les BCPI és majoritàriament encara actualment artesanal i intuïtiva i, conseqüentment, lenta.

Arran d'això, els sistemes productius suporten una gran dependència del factor humà que les empreses pretenen evitar. Primerament, per la inèrcia que els sistemes humans (i els modes d'operació "de tota la vida") oposen als canvis i que dificulten, precisament, la desitjada adaptació als canvis. En segon lloc, per tal de suprimir tant les pèrdues de productivitat ocasionades per l'absència del planificador (en percentatges notables de fins el 30 %) com per eliminar també el lligam que això suposa amb la persona del planificador.

Els trets generals per a una eina informàtica per a la presa de decisions en l'operació de les BCPI ja són ben definits. Tothom admet la importància primordial de la interfície d'usuari (*user interface*) per tal que els usuaris puguin manejar fàcilment la gran quantitat de dades necessàries i resultats generats (a través menús i finestres) i copsar-ne l'essència visualment mitjançant les seves possibilitats gràfiques.

En acceptar també la dificultat, o gairebé impossibilitat, d'obtenir solucions realment òptimes en tots els aspectes i en un temps de càlcul raonable, esdevé imprescindible un sistema

interactiu i alhora robust que permeti l'usuari modificar i retocar els plans generats amb garanties de la factibilitat de les seves propostes.

Finalment, l'aprofitament màxim d'una eina d'aquestes característiques s'obtindrà a través de les seves possibilitats de simulació de l'operació de la planta. L'estudi de les possibles respostes de la planta davant noves situacions permetrà els seus responsables un coneixement més ampli de la capacitat productiva de la fàbrica i l'adopció de les mesures preventives oportunes enfront de situacions previsibles.

L'evolució experimentada en els darrers temps pel *software* fa possible el desenvolupament d'eines de les característiques esmentades mitjançant aplicacions per a la gestió de finestres (WINDOWSTM de Microsoft, MOTIFTM d'IBM, etc.) i que permeten una molt fàcil interactivitat amb l'usuari gràcies a la utilització del ratolí (*mouse*). Per la seva banda, l'abaratiment del *hardware* ha conduït a màquines assequibles a les petites i mitjanes empreses amb potències de càlcul i capacitats de memòria cada vegada més grans. La inversió en sistemes informàtics per a la gestió de la producció i la programació de les operacions de les BCPI ja està plenament justificada.

1.2.3. Investigació operativa.

La programació d'activitats (*scheduling*), i no tan sols d'operacions de fabricació, és una necessitat compartida per la indústria, la gestió i l'administració, els serveis, etc. La investigació operativa (*operations research*) és la disciplina que s'ha dedicat d'una manera general a la recerca de tècniques de solució d'aquests problemes des dels anys 50. La literatura dedicada al tema és, doncs, extensa.

Nogensmenys, diferents branques de l'enginyeria i la gestió (*management*) que han necessitat aquest tipus de tècniques han hagut de desenvolupar metodologies pròpies adaptades a llurs problemes particulars. No ha estat aquest el cas dels processos químics els quals, llevat de la ja esmentada excepció del refinament del petroli, havien restat indiferents a aquesta necessitat.

En esdevenir imprescindibles, la planificació de la producció i la programació d'operacions de les BCPI manlleven les tècniques de la investigació operativa. Aquest manlleu, però, resulta també insuficient per abordar els problemes particulars de la indústria química i és així que resulta necessària la recerca concreta en aquest camp. Les mancances més notables de la investigació operativa apareixen en la modelització de les operacions pròpies de la indústria de procés químic, que és on se centra en bona part aquest treball.

El taller mecànic és un problema emblemàtic de la investigació operativa clàssica (*workshop problem*, Baker, 1974). El model utilitzat per descriure les operacions en el problema del taller mecànic no contempla necessitats de transferència de les peces entre les diferents tasques donat que l'aproximació que això significa és prou acurada.

Tanmateix, els processos químics no permeten aquesta simplificació: els fluids amb els quals treballen en lloc de peces han d'ésser tractats atenent llur necessitat de contenidors adequats, quan a capacitat i condicions per a garantir l'estabilitat dels materials en procés, i llur necessitat de temps i d'unitats específiques de transferència (bombes, canonades, etc.).

El menysteniment de la natura intrínsecament contínua dels productes químics (del grec *khymós*, suc) porta irremissiblement al fracàs que il·lustra la figura 1.4. De la mateixa manera, la consideració de peces indivisibles és incompatible amb la possibilitat de repartiment de lots de productes químics entre diversos reactors de suficient capacitat. O ben al contrari, la concentració de diversos volums de productes intermedis en un reactor que compleixi les restriccions de capacitat.

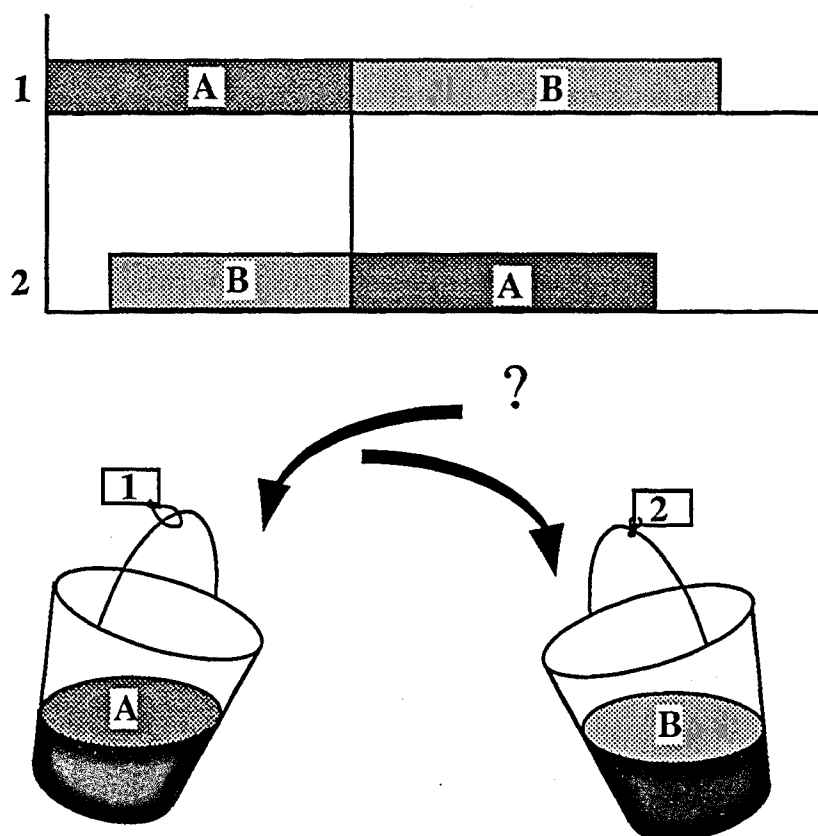


Fig. 1.4. Consideració de les necessitats de transferència i emmagatzematge.

La funció dels tancs d'emmagatzematge intermig sorgeix finalment al fer referència a la capacitat de concentració i dispersió de volums de producció. D'aquesta manera, els tancs d'emmagatzematge en la indústria química no s'utilitzen tan sols com a contenidors d'un

determinat volum de producció en espera de la següent etapa de procés sinó també com a pulmons que ajusten la productivitat de zones de la planta amb diferents capacitats de producció. Donada la importàcia que juguen els tancs d'emmagatzematge en els resultats presentats en aquesta tesi, aquests seran tractats posteriorment amb més detall.

1.3. Objectius

Aquest treball de tesi s'emmarca dins la línia de recerca del Grup de Processos del Departament d'Enginyeria Química de la UPC. Així, la feina realitzada ha conduït a l'ampliació d'un programa informàtic sota desenvolupament permanent per part d'aquest Grup. Aquest programa constitueix una excel·lent eina d'anàlisi de l'operació de les plantes químiques discontinües i és alhora un banc de proves per altres metodologies que es desenvolupen per al tractament de problemàtiques relacionades (integració energètica, minimització de residus, fiabilitat i manteniment...).

Es fa difícil pensar que, a curt o mig termini, un paquet informàtic pugui esdevenir una eina estàndard i d'utilitat general per a la gestió de l'operació de qualsevol procés químic discontinu. Així doncs, els objectius pràctics finals d'aquesta tesi són la proposició d'un model per a la descripció de l'operació de la planta i, conjuntament, d'una metodologia per a la programació òptima d'aquestes operacions, ambdós entesos com idees fàcilment incorporables en el disseny i desenvolupament d'eines informàtiques per al tractament de cada un dels múltiples casos particulars.

El model ha de ser suficientment general i flexible per incorporar amb facilitat les característiques pròpies de cada cas industrial. Alhora, també, ha de ser prou detallat com per contemplar aquells aspectes que ignoren altres models més simplificats i que esdevenen determinants en la indústria química discontinua (operacions de transferència i d'emmagatzematge d'intermedis, neteges depenents de la seqüència, etc...) i sense oblidar els aspectes comuns a molts altres processos industrials com són les limitacions de serveis generals.

La metodologia per a la programació òptima de les operacions ha de ser complementària al model. Donada la dificultat per definir un objectiu general comú a totes les situacions en aquest treball s'adoptaran objectius estàndard com són el temps de finalització de les operacions (*makespan*) o bé la productivitat (B/T) quan es tracti de cicles d'operacions. La metodologia per a la programació d'operacions, però, ha de ser el màxim d'independent de l'objectiu triat per tal de que es puguin tractar tant altres objectius també acadèmics (*flowtime*,

tardiness, etc...) com les funcions particulars que a ben segur apareixen en cada cas industrial.

Adicionalment, la planificació de la producció, que és un problema encara molt més particular, es considerarà en algun cas a tall merament d'exemple per comprovar la factibilitat tant del model com de les metodologies proposades. S'adoptarà per això un model multiperíode simple amb l'única intenció d'incloure variacions de demanda i parades de planta.

ANTECEDENTS

2. ANTECEDENTS

2.1. Terminologia: definicions i classificacions

El propòsit d'aquest apartat és un breu repàs dels conceptes bàsics establerts en els estudis previs sobre el tema així com una introducció al llenguatge que els hi és propi. Per un major aprofundiment hom pot adreçar-se tant al treball de Yeh i Reklaitis (1987) com al de Puigjaner i Espuña (1991).

Entre els conceptes fonamentals cal destacar la dimensió de lot B (*batch size*) i el temps de cicle T o temps de cicle limitant LCT (*limiting cycle time*). S'anomena dimensió de lot a la quantitat de producte final obtingut al termini de la seqüència d'operacions indicades en la recepta d'aquest producte. Aquesta quantitat es troba limitada per la capacitat dels equips utilitzats i les corresponents restriccions es poden manejar fàcilment introduint el concepte de factor de capacitat S .

A la figura 2.1 es detallen els volums necessaris en cada etapa per a la fabricació d'un lot de 500 kg de producte final P . Aquests volums inclouen els balanços de matèria, les densitats i factors de seguretat, etc. El quocient entre els volums necessaris per cada etapa i la dimensió de lot que permeten obtenir s'anomena factor de capacitat per aquesta etapa j .

Els factors de capacitat permeten l'extrapolació a casos de diferent dimensió de lot o l'establiment de la cota superior d'aquesta dimensió de lot per qualssevol capacitats dels equips dels quals es disposa. Llavors, per al cas d'un sol producte, la realització d'una tasca j implica:

$$B \leq V_j / S_j \quad (2.1)$$

en cas de diferents productes i ,

$$B_i \leq V_j / S_{ij} \quad (2.2)$$

o bé si per a la realització d'aquesta tasca j es pot emprar un conjunt d'equips m ,

$$B_i \leq \sum_m \frac{V_m}{S_{ijm}} \quad (2.3)$$

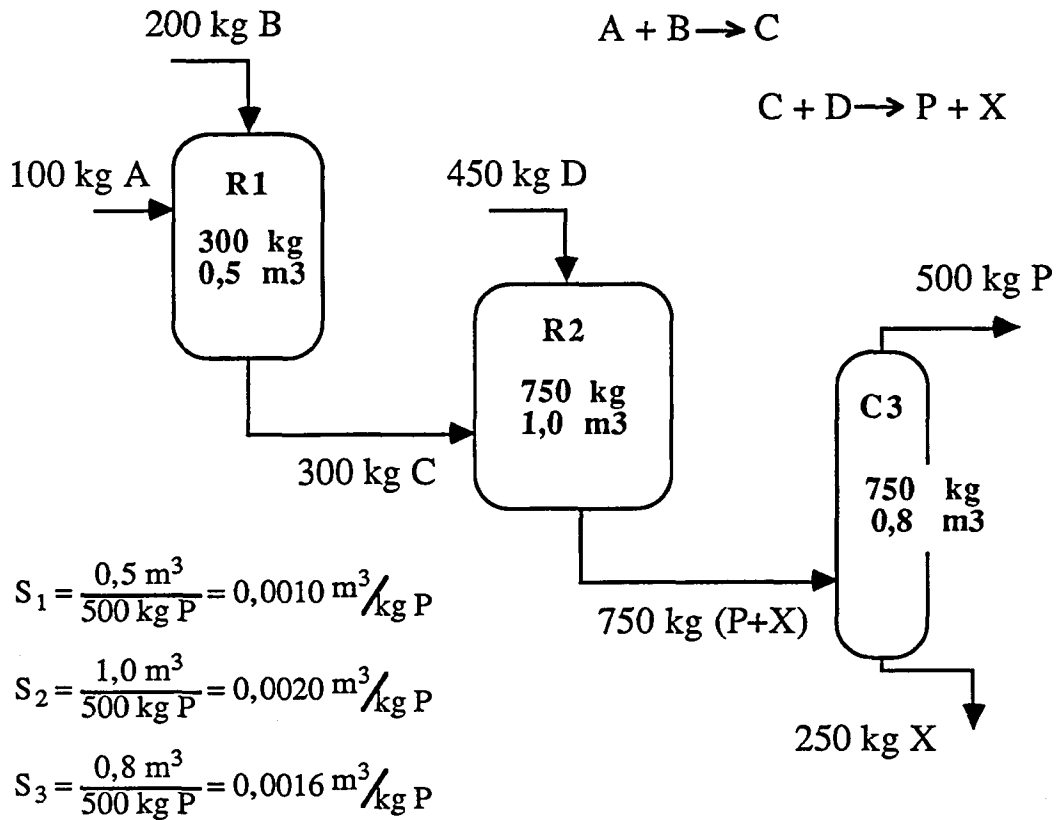


Fig. 2.1. Factors de capacitat, capacitat mínima dels equips i dimensió de lot obtinguda.

El temps de cycle T es defineix com la freqüència d'obtenció de lots en una seqüència de producció periòdica. Si aquesta freqüència correspon al cas de treballar a ple rendiment, aquest temps de cycle esdevé el temps de cycle limitant LCT (*limiting cycle time*). Per al cas de productes amb una única ruta de producció possible, aquest temps és equivalent, per cada producte i , al temps de procés t_{ij} més gran de la recepta (sempre que aquests productes es fabriquin separatament - Fig. 2.2):

$$T_i = \max_j \{t_{ij}\} \quad (2.4)$$

El temps de cycle també es pot definir per seqüències multiproducte si aquestes són regulars i periòdiques. Llavors, però, el temps de cycle no és directament calculable amb una expressió del tipus 2.4 i cal simular un cycle complet d'operacions per tal d'avaluar-lo (Fig 2.3). En algunes situacions també caldrà tenir en compte la dependència del temps de les operacions de la càrrega processada B i d'aquí la dependència del temps de cycle respecte d'aquesta càrrega a més de la tasca:

$$T_i = \max_j \left\{ a_{ij} + b_{ij} \cdot B_i^{c_{ij}} \right\} \quad (2.5)$$

on l'expressió dels temps de procés en funció de la dimensió de lot ha estat escollida per la seva flexibilitat i generalitat (Mauderli, 1979). Les diferents situacions particulars que es puguin presentar es podran tractar sempre amb expressions específiques més acurades.

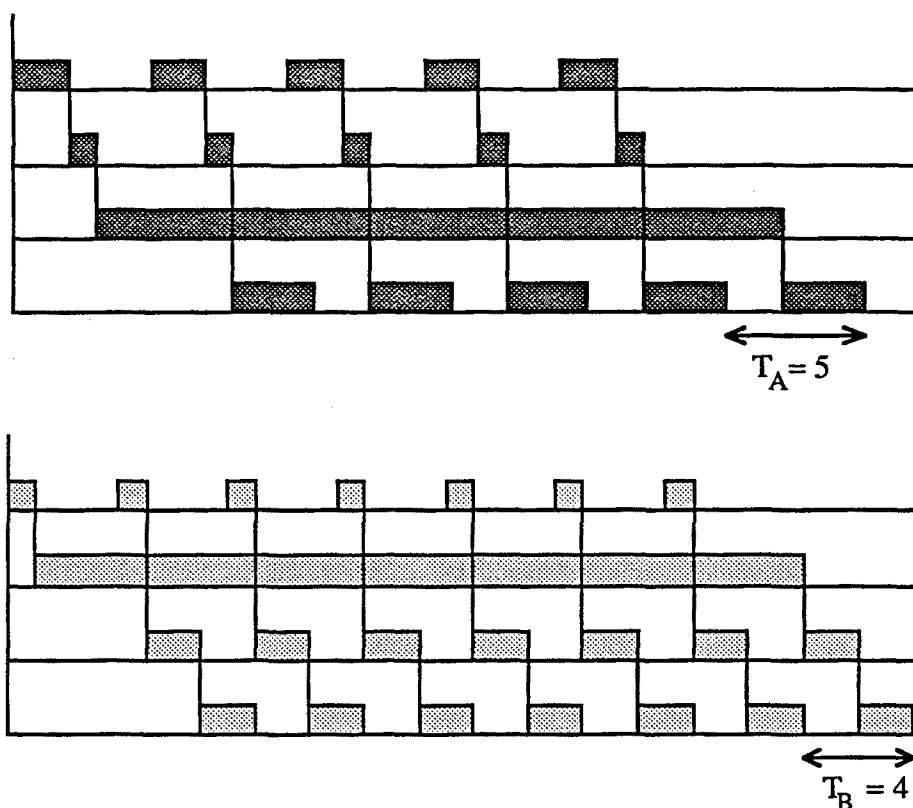


Fig. 2.2. Temps de cycle limitant per a casos simples.

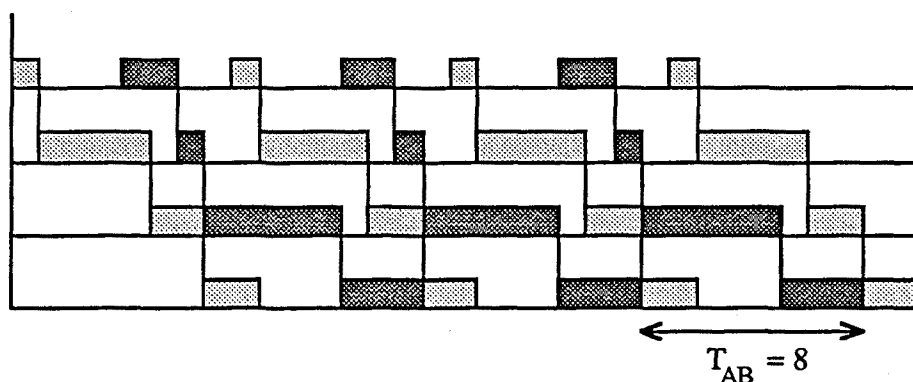


Fig. 2.3. Temps de cycle limitant per una seqüència heterogènia i periòdica.

Tant les dimensions de lot B com els temps de cycle T són magnituds que sorgeixen d'una concepció rígida del procés de producció, sense alternatives en la recepta i en les possibilitats de seqüenciació. D'aquí també, i per analogia amb els processos continus, en deriva la idea de productivitat, definida com B/T i que esdevé l'objectiu a maximitzar. Amb aquesta intenció s'han proposat diferents estratègies destinades a la cerca i eliminació dels colls d'ampolla (*bottleneck*).

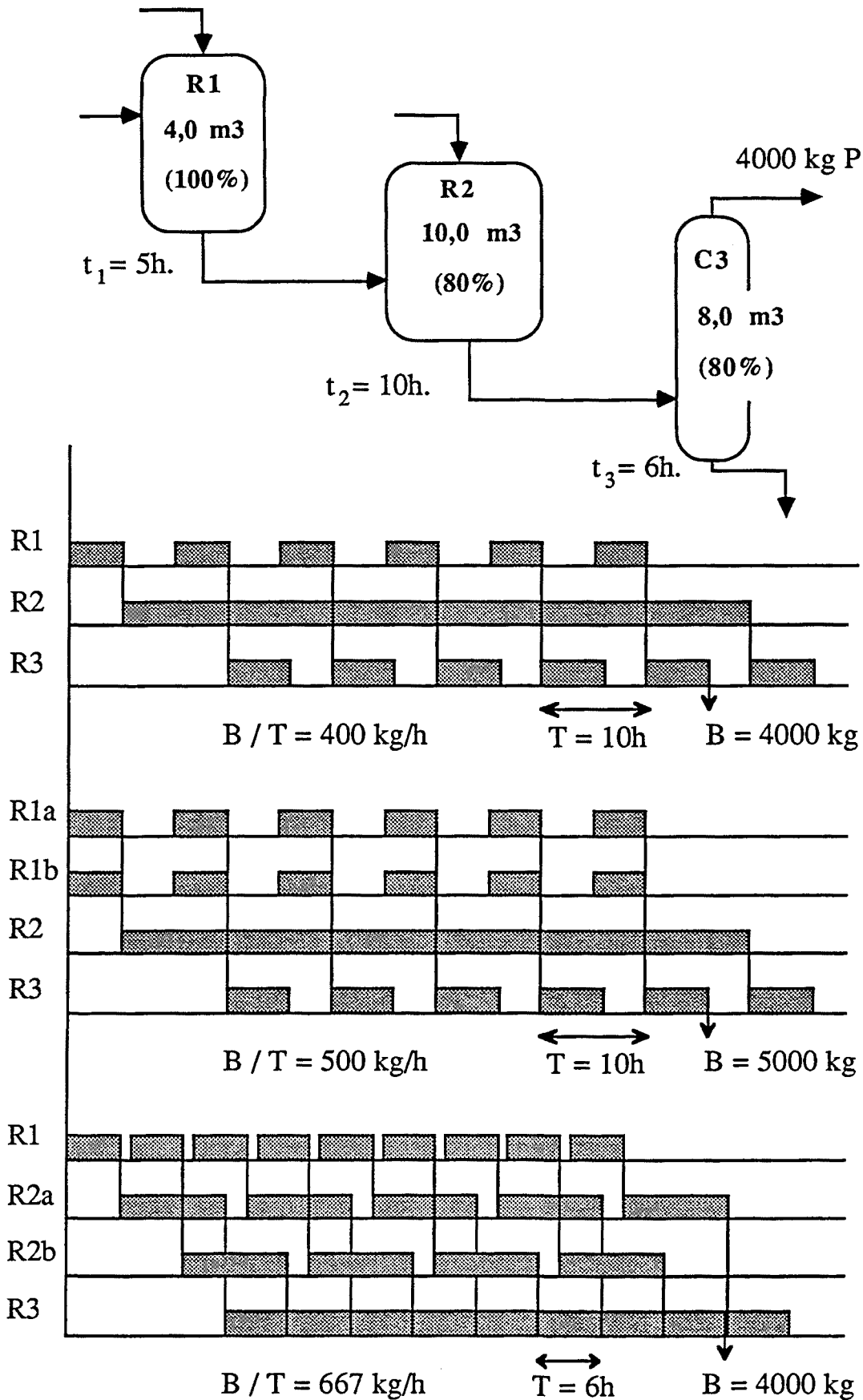


Fig. 2.4. Alternatives per a l'ampliació de la capacitat de producció d'un procés discontinu.

A tall d'exemple, en el procés de la figura 2.4 s'han identificat les etapes primera (R1) i segona (R2) com a etapes limitants quan a capacitat i temps respectivament. Les opcions per augmentar la productivitat d'aquest procés consisteixen en la incorporació d'altres reactors que permetin l'augment de la dimensió del lot mitjançant l'operació en fase en la primera etapa (max B) o la reducció del temps de cicle mitjançant l'operació fora de fase en la segona (min T).

Sota l'òptica de paràmetres generals com les dimensions del lot i els temps de cicle, aquest tipus d'anàlisi és l'únic possible tant a nivell de disseny, remodelació o ampliació de la planta com de planificació de la producció.

Emmagatzemament intermig

Tant les dimensions de lot com els temps de cicle es veuen afectats per les diferents polítiques d'espera i/o emmagatzemament possibles. Les regles de transferència de materials entre etapes poden donar opció a diferents programes d'operacions amb diferents resultats pel què fa referència al temps d'ocupació de la planta. Habitualment se'n distingeixen tres:

- *UIS (unlimited intermediate storage)*. L'emmagatzemament il·limitat assumeix que qualsevol quantitat d'intermedi produïda en un equip es pot emmagatzemar fora d'aquest equip de manera indefinida i es pot recuperar en qualsevol moment que es necessiti. Gràcies a això les tasques es poden iniciar en qualsevol moment posterior a la finalització de la corresponent tasca anterior (Fig 2.5a). Si bé la independència de certes operacions es pot descriure correctament d'aquesta manera, l'UIS fracassa com a regla general per a l'operació de tota la planta, sobretot quan es processen substàncies líquides.
- *ZW (zero wait)*. L'espera nul·la suposa que tots els intermedis generats han de ser processats immediatament de manera que cal disposar a temps de l'equip que ho permeti. L'assumpció que tots els intermedis són inestables és sempre possible però d'altra banda força rígida (Fig 2.5b). La figura 2.5b il·lustra també com cal replantejar les decisions preses segons la política de transferència escollida.
- *NIS (no intermediate storage)*. La consideració d'intermedis estables juntament amb l'absència de tancs d'emmagatzemament permet altres opcions com la que mostra la figura 2.5c on el mateix reactor s'utilitza per guardar indefinidament l'intermedi generat.

En aquest treball s'englobaran les dues darreres polítiques en una de sola:

- *FW (finite wait)*. L'espera finita d'un intermedi dins del reactor que l'ha generat no pot ser superior al temps d'estabilitat d'aquest intermedi en aquest reactor. FW deriva en ZW en cas d'intermedis inestables o en NIS en cas d'intermedis inalterables.

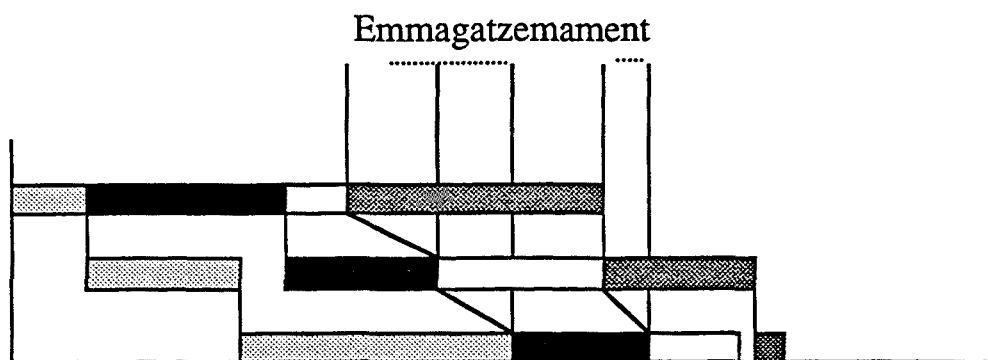


Fig. 2.5a. Polítiques d'emmagatzemament i regles de transferència: UIS.

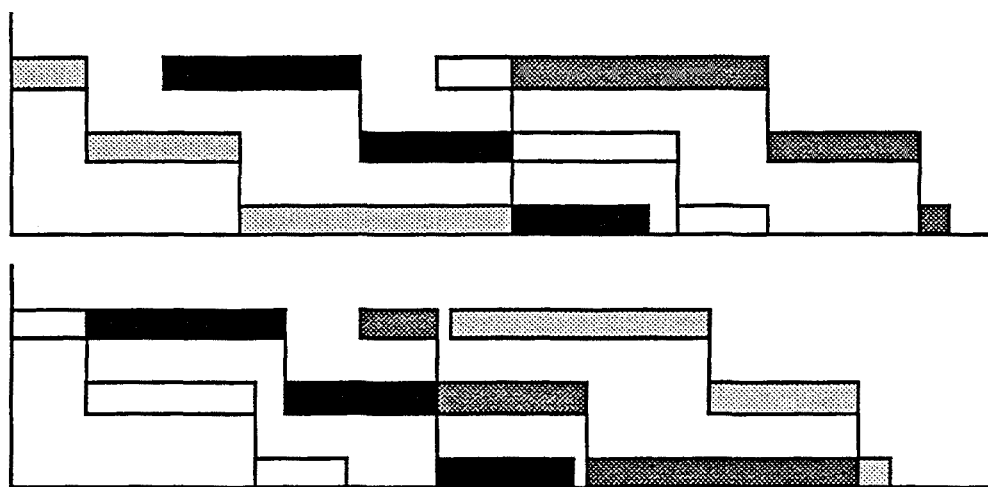


Fig. 2.5b. Polítiques d'emmagatzemament i regles de transferència: ZW.

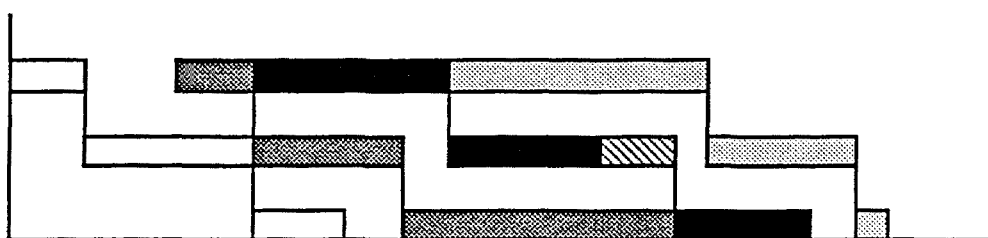


Fig. 2.5c. Polítiques d'emmagatzemament i regles de transferència: NIS.

Les opcions ZW, FW i NIS afecten només els temps d'inici i finalització de les operacions. Es tracta de polítiques d'espera a les quals també es pot considerar d'emmagatzemament de temps. Pel què fa referència a les dimensions del lot, el mateix balanç de matèria segons l'expressió 2.2 s'aplica a totes les tasques de la recepta.

Tanmateix, l'emmagatzemament també permet segmentar la recepta en trens de producció d'intermedis de manera que, si bé cal observar el balanç de matèria global, les tasques de cada tren obeeixen una expressió similar a la 2.2 segons una quantitat d'intermedi que els hi és pròpia. Els dipòsits d'emmagatzemament són així utilitzats com a pulmons (*buffers*) amb

la missió de desacoblar zones de la planta amb diferències de capacitat i temps de procés (Fig. 2.6). El lligam entre les zones s'expressa de nou recorrent al concepte de productivitat:

$$\frac{B_1}{T_1} = \frac{B_2}{T_2} \quad (2.6)$$

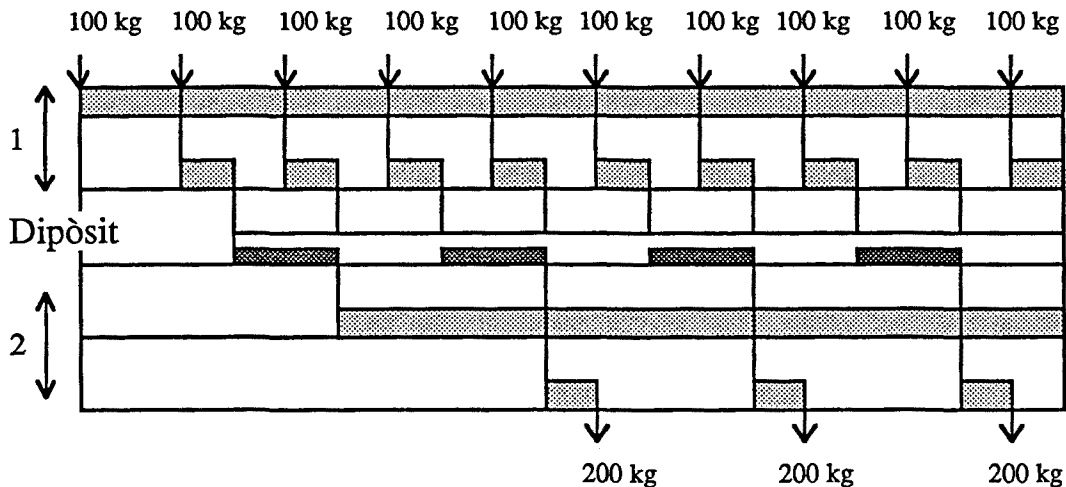


Fig. 2.6. El paper dels dipòsits d'emmagatzemament intermig.

La fabricació de diferents quantitats d'intermedis i el seu emmagatzemament al llarg de la ruta de producció necessita de la gestió adequada d'aquests intermedis. Aquest problema es pot abordar sota la perspectiva de dues polítiques generals:

- *UIS (unlimited intermediate storage)*. Sota la hipòtesi d'emmagatzemament il·limitat només és necessari observar les relacions de precedència en la producció d'intermedis al llarg del temps i el balanç global de matèria.
- *FIS (finite intermediate storage)*. La consideració real de limitacions en la capacitat d'emmagatzemament no tan sols significa una restricció sobre les quantitats que poden ser emmagatzemades sinó també sobre quins intermedis poden utilitzar de forma exclusiva els dipòsits disponibles en cada instant.

La coincidència de diverses de les polítiques esmentades en un mateix cas rep el nom de política d'emmagatzemament mixta, *MIS (mixed intermediate storage)*.

Modes d'operació

La ja esmentada utilització d'equips operant en paral·lel, ja sigui en fase o fora de fase, constitueix un model d'operació prefixat. Molts processos operen segons models predeterminats que se suposen prou adequats i que faciliten la gestió i el control de les operacions. D'una manera més general s'anomena campanya a qualsevol interval de temps dedicat a la fabricació d'un o més productes segons una seqüència periòdica d'operacions.

L'operació en campanya presenta avantatges de comprensió i, conseqüentment d'aplicació, per la qual cosa sovint resulta més desitjable que altres modes d'operació irregulars de potser més alt rendiment. Tant és així, que casos complexos amb múltiples possibilitats d'assignació d'equips es plantegen com problemes de cerca de les millors campanyes de productes compatibles.

S'entén per campanyes compatibles aquelles que, degut a l'assignació d'equips, poden ser executades de manera simultània i independent. Sota aquest mode d'operació, els equips disponibles de la planta es reparteixen durant cada campanya en subconjunts independents que es dediquen cada un a un producte específic.

Moltes plantes mantenen aquesta assignació de tasques per a un o un determinat conjunt d'equips de forma permanent. L'assignació pot anar realment lligada a la situació física dels equips a la planta. En aquests casos es parla de línies de producció per anomenar cada un dels grups d'equips destinats *a priori* a unes tasques o uns productes concrets. El nom de rutes o camins de producció es reserva per identificar possibles assignacions d'equips o grups d'equips a les tasques de la recepta d'un producte i assenyalar les distintes maneres de produir-ne un lot.

Criteris d'optimització

Els problemes de gestió òptima de l'operació de planta es poden plantejar en termes de diferents tipus d'objectius. Evidentment, el màxim benefici econòmic és sempre l'objectiu final però això és molt particular i de difícil avaluació. Es poden plantejar objectius més simples l'assoliment dels quals comporta implícitament una millora econòmica. Existeixen diferents objectius estàndard:

- Productivitat (B/T). En cas que el problema pugui ser considerat com un conjunt de subproblemes monoprodute l'objectiu consistirà evidentment en la maximització de les relacions de dimensió de lot i temps de cicle.

Quant a objectius generals més relacionats amb la programació de les operacions:

- *Makespan*. Temps de finalització de totes les operacions programades. És un objectiu a minimitzar amb la intenció de disposar del màxim de temps per continuar produint i obtenint beneficis. La minimització d'aquest temps tendeix a la màxima ocupació productiva dels equips de procés.
- *Flowtime*. Temps total de la planta que consumeix cada operació. És la diferència entre el temps de finalització de l'operació i el moment en què l'equip utilitzat estava disponible. L'objectiu és la minimització del seu valor mig (*mean flowtime*) o del seu valor màxim (*maximum flowtime*) per a totes les operacions.

Quant a objectius més concrets cal esmentar aquells relacionats amb les dates de lliurament de les comandes:

- *Lateness*. Diferència de temps entre la finalització d'un lot de producte i la seva data de lliurament. És un valor que pot ser positiu o negatiu i no constitueix un bon objectiu per sí sol.
- *Tardiness*. Retard d'un lot respecte la seva data de lliurament. És el valor de *lateness* si aquest és positiu o és zero altrament. L'objectiu esdevé en aquest cas la minimització del valor mig (*mean tardiness*) o el valor màxim (*maximum tardiness*) per a tots els lots. També pot constituir un altre objectiu a minimitzar el número de lots que arriben amb retard (*number of tardy jobs*).

Mentre que els objectius generals condueixen a programes òptims *per se*, els altres generen programes adequats a condicions externes com són les dates de lliurament. Així doncs, un mateix programa d'operacions pot resultar òptim per una determinada situació però ineficient en una altra.

Quant aquest tipus d'objectius esdevenen insuficients per a casos particulars cal desenvolupar funcions de cost específiques per a l'avaluació de la millora. Si aquestes funcions de cost han de ponderar diferents subobjectius contraposats el problema de la seva minimització es pot complicar extraordinàriament i sovint resulta imprescindible fer-ho mitjançant estratègies desenvolupades *ad-hoc* per al cas i la funció. A l'apartat 2.2 es torna a incidir de nou en aquest tipus de dificultats.

Problemes de programació d'operacions

Els problemes de programació d'operacions també es classifiquen habitualment segons les característiques dels processos als quals es refereixen. La investigació operativa distingeix dos models d'operació per a dos tipus de problemes diferenciats:

- *Flowshop*. És aquell sistema productiu en el qual cada etapa de producció s'executa en una única unitat de procés i tots els productes segueixen necessàriament la mateixa seqüència de treballs en les mateixes unitats. El flux de materials a través de la planta és sempre el mateix.
- *Jobshop*. És aquell sistema productiu en el qual no existeix cap patró únic per al flux de materials a través dels equips de la planta. Això pot ser conseqüència tant de la possibilitat de realitzar una mateixa operació en diferents equips alternatius com que les receptes dels productes permetin operacions en equips diferents.

Els programes d'operacions en els quals la permutació de dues operacions que tenen lloc en un mateix equip implica la permutació de totes les operacions dels lots als quals pertanyen s'anomenen programes permutables (*permutation schedules*). Altrament els programes que no queden perfectament definits per una seqüència permutable de números enters s'anomenen no permutables (*non-permutation schedules*).

Els millors programes que s'obtenen en casos *jobshop* acostumen a ser no permutables, malgrat poden ser-ho o es poden imposar. Els programes permutables són, en principi, inherents l'operació tipus *flowshop*, encara que, tal i com es veurà en aquest treball, això no és forçosament d'aquesta manera quan es consideren etapes d'emmagatzematge de productes semielaborats (intermedis).

En el cas de les BCPI existeixen definicions relacionades (Reklaitis, 1992) però que s'adrecen a problemes de seqüenciació de campanyes de llarga durada. Tres són els principals tipus de plantes de funcionament discontinu:

- Plantes multiproducte. Són aquelles destinades a la fabricació de productes químicament similars. Com a resultat, el model d'operació és essencialment de tipus *flowshop*, tot i que s'acostumen a admetre lleugeres variacions com diferent número d'etapes (p.e. etapes de purificació) o polítiques FIS senzilles que impliquin només campanyes monoproducte.
- Multiplantes (Espuña i Puigjaner, 1989). Es tracta de plantes amb l'estructura de dues o més plantes multiproducte operant en paral·lel i compartint alguna recurs limitat (que és l'origen de la interdependència dels subproblemes multiproducte).
- Plantes multipròposit. Es tracta de plantes que permeten obtenir productes diversos amb processos de fabricació i ordre d'utilització dels equips diferenciats. És possible disposar de diversos equips alternatius per executar una mateixa tasca i un mateix producte pot seguir camins diferents a través de la planta donant lloc a diferents dimensions de lot.

Aquest treball de tesi s'adreça precisament al cas multipròposit general per al qual es considera que qualsevol equip podria realitzar qualsevol de les tasques de la recepta de qualsevol producte. Malgrat tot, és difícilment imaginable una planta tant flexible com per emprar un reactor per realitzar una destil·lació o una filtració. Aquest serà, però, el model ideal que es contraposarà a la rigidesa d'assignació de les plantes multiproducte.

2.2. Optimització combinatòria

La presa de decisions és, en principi, una tasca subjectiva en tant que humana. L'encert d'aquestes decisions depèn de la capacitat d'anàlisi i valoració de les diferents opcions i llurs conseqüències. Sovint, la intuïció supleix l'anàlisi de la gran quantitat d'informació que això suposa. És per això que ha estat necessari idear tècniques quantitatives d'ajuda a la presa de decisions que reduïssin, tant com fos possible, la seva subjectivitat.

L'optimització és el procediment pel qual es determinen els valors que cal que prenguin les variables que defineixen o governen un sistema per tal de que aquest sistema sigui o es comporti de la millor manera possible. Aquests valors són els que s'anomenen òptims. En aquest procés cal contemplar diversos aspectes a més de les tècniques matemàtiques de maximització o minimització de funcions amb les quals s'identifiquen correntment els problemes d'optimització (Westerberg, 1992).

En primer lloc, cal aconseguir la manera de determinar la resposta del sistema estudiat davant les decisions que es puguin prendre. L'examen del sistema mateix acostuma a ser inviable i és per això que es recorre a una representació suficientment acurada del sistema, que es pot tractar tant d'un model físic a escala com d'un model matemàtic. En segon lloc, cal definir una mesura del grau de bondat de les respostes obtingudes per tal de quantificar les alternatives i eliminar la subjectivitat de la definició d'allo que és millor. Aquesta mesura s'anomena funció objectiu. Finalment, és necessari un mètode de cerca que permeti arribar al millor conjunt de variables de decisió el qual s'identificarà pel valor màxim (o mínim) que provoqui en la funció objectiu.

Així mateix, el procés d'optimització en sí té un cost, quan a temps i diners, que també forma part del problema. El cost de l'optimització s'haurà de considerar acceptable o no en funció dels beneficis que se n'esperen obtenir*. Sovint, però, la determinació de la solució òptima, entesa com aquella que és millor que qualsevol altra possible, és massa costosa. Garantir la optimalitat, sobretot, pot representar un escull insalvable. Llavors, l'obtenció a un cost raonable d'una solució millor que qualsevol de les conegudes esdevindrà l'objectiu de l'optimització que, estrictament i en aquest cas, s'hauria d'anomenar suboptimització (Arbones, 1989). Els mètodes i algorismes de suboptimització reben el nom d'heurístics.

* És il·lustratiu un exemple d'optimització com el joc d'escacs. L'estratègia emprada és totalment diferent en una partida ràpida o en una partida sense rellotge. Tanmateix, es tracta del mateix problema i del mateix objectiu.

Quant l'única manera de conèixer les respostes d'un sistema és mitjançant l'experimentació directa sobre el sistema físic, la seva optimització (suboptimització) inclourà, molt probablement, la minimització del número d'experiments a realitzar. Si és possible, però, sempre resulta molt més interessant abstrure el comportament del sistema en un model matemàtic. A part de resultar molt més manejable i versàtil, és possible que la funció objectiu del model pugui ser maximitzada (o minimitzada) sota les restriccions del model mitjançant mètodes matemàtics generals.

El procés d'optimització, però, no es limita a l'aplicació d'eines matemàtiques ja conegudes sinó que s'extén al plantejament mateix d'aquest problema matemàtic. Tanmateix, el coneixement d'aquestes eines pot influir en aquest plantejament. Així, durant la confecció del model, caldrà ponderar adequadament el fet de que aquest model sigui prou acurat respecte que sigui tractable o senzillament ressoluble. Quant als mètodes matemàtics que es poden emprar, existeix una extensa literatura, tant per a problemes amb variables contínues (Fletcher, 1987; Beveridge i Schechter, 1970, Edgar i Himmenblau, 1988) com per problemes amb variables discretes (Nemhauser i Wolsey, 1988), però és molt limitada pel què fa als aspectes més creatius de la modelització (Williams, 1988).

Per contra, si el model matemàtic és complicat resultarà difícil trobar mètodes, ni generals ni específics, de cerca de la direcció de la millora i de l'òptim. Tot i així sempre es possible recórrer a la intuïció o fins i tot a la cerca a l'atzar si es disposa de mecanismes que permetin preveure i avaluar les respostes del sistema a les decisions proposades. El conjunt d'equacions que integren el model matemàtic proporcionen els valors de les variables resposta en funció de qualsevol conjunt de variables de decisió d'una manera ràpida i barata. Així, la implementació d'aquestes equacions en un programa d'ordinador proporciona una maqueta informàtica del sistema, un simulador, que permet assajar diferents decisions.

El raonament humà és capaç de recibir en la solució de problemes complexos de manera no algorítmica, essent precisament això el què frustra la possibilitat d'entendre i reproduir els procediments emprats (Penrose, 1991). El fet anima a creure en les possibilitats de la intel·ligència artificial (*artificial intelligence*, AI) per a resoldre l'optimització de sistemes complexos. De moment, però, la seva aplicabilitat és encara reduïda i cal pensar, doncs, en aquells mecanismes que permetin una simbiosi entre la rapidesa de càlcul algorítmic de l'ordinador i la intuïció del seu usuari com les eines més semblants i alhora eficients.

És per això que en molts casos és essencial disposar d'un simulador manipulable que deixi l'usuari provar i modificar diferents alternatives i veure'n les conseqüències. Generalment, la gran majoria de decisions es pot prendre, per la seva obvietat, mitjançant regles molt concretes i, per tant programables. Llavors, una bona eina d'optimització la constituirà un programa informàtic que faci la feina bruta de manera ràpida i deixi per l'usuari les decisions conflictives, així com la possibilitat d'assajar-les i avaluar-les personalment. Sovint, quan els

criteris d'optimització no són prou clars, els resultats obtinguts d'aquesta manera acostumen a merèixer més credibilitat i confiança per part de la persona responsable de la decisió final que qualsevol altre resultat únic obtingut automàticament.

Optimització contínua

Els models que són formulables mitjançant funcions contínues presenten propietats matemàtiques molt interessants de cara a llur optimització. És precisament la garantia de continuïtat de les funcions el que permet els conceptes de derivada i gradient que tenen un clar lligam amb els problemes d'optimització. Així, per a les funcions contínues:

- Existeix una mesura de la direcció i sentit de la millora de la funció objectiu respecte de les variables. Donat un punt factible el valor del gradient en aquell punt informa de com cal modificar les variables per obtenir un punt proper i millor.
- Existeix la condició d'optimalitat. Aquell punt amb gradient nul és aquell que no té cap punt proper millor. És localment òptim i conseqüentment els punts de l'entorn són descartables.

Per trobar analíticament punts singulars de funcions contínues es proposa directament la cerca dels valors que anul·len el gradient. La resolució numèrica, però, és una necessitat més corrent. Els mètodes numèrics poden ser de cerca directa o de gradient. Aquests darrers, més eficients, realitzen una aproximació iterativa vers l'òptim basada en la direcció del gradient i que convergeix en un apropament suficient quan el gradient és prou petit. Els mètodes del descens i del gradient conjugat en són exemples clàssics (Beveridge i Schechter, 1970), però amb serioses limitacions de convergència per a problemes complexos.

En els problemes que inclouen restriccions la cerca s'ha de veure limitada a una determinada regió factible. En aquests casos s'intenta incloure les restriccions del problema en una única funció objectiu mitjançant l'utilització de funcions de penalització. Amb caire més general s'empren els multiplicadors de Lagrange en mètodes com GRG (*Generalized Reduced Gradient*, Lasdon et al., 1978) i SQP (*Successive Quadratic Programming*, Gill et al., 1983) que, actualment, representen les millors opcions per a l'optimització d'aquest tipus de problemes.

El gran problema dels mètodes numèrics encara pendent és la determinació de l'òptim global dins la regió factible. Les metodologies esmentades porten fins a l'òptim local més proper al punt de partida. Tanmateix, no hi ha cap garantia que aquest sigui l'únic òptim local ni molt menys, per tant, que sigui el global. L'elecció d'un bon punt de partida esdevé una qüestió essencial.

Antecedents

En el cas particular que la funció objectiu sigui lineal el gradient sempre és constant i no existeix cap punt per al qual s'anul·li (llevat òbviament que la funció sigui constant). Però aquest fet implica, precisament, que els valors extrems de la funció objectiu es trobaran en els límits de la regió factible i això pot simplificar el problema malgrat que, en cas de restriccions no lineals, qualsevol dels infinits punts frontera pot ser un extrem d'una funció objectiu lineal.

En canvi, les restriccions lineals delimiten una regió factible poligonal (en general un n-políedre per un problema n-dimensional) i els valors extrems d'una funció objectiu també lineal es trobaran certament en els vèrtex de la regió factible (definites per les interseccions de les restriccions). L'avantatge més important d'aquests problemes rau en què el número de vèrtex de qualsevol políedre és finit i és per això que han estat àmpliament estudiats.

Els problemes d'optimització amb funcions objectiu lineals sota restriccions també lineals s'anomenen problemes de programació lineal LP (*Linear Programming*). Per contraposició, també es parla de problemes NLP (*Non-linear Programming*).

La resolució dels problemes LP és possible mitjançant diversos mètodes (Metzger, 1958). Tots ells són essencialment tècniques de cerca directa mitjançant les quals s'examinen sistemàticament tots els contorns. El mètode SIMPLEX, desenvolupat primerament per Dantzig el 1947, és el més popular i utilitzat de tots ells i es troba convenientment descrit i ampliat en l'obra del mateix Dantzig (1963).

El mètode SIMPLEX és un procediment iteratiu en el qual, partint d'un vèrtex qualsevol, cada punt d'intersecció factible s'obté a partir de l'anterior, sempre en la direcció que millora la funció objectiu. El procediment s'atura quan no és possible obtenir cap millora. Es tracta, essencialment, d'un procés d'assaig i error però formulat de tal manera que permet un tractament matemàtic sistematitzat que en facilita l'execució.

Recentment, ha estat desenvolupat un algorisme (Karmarkar, 1984) per als problemes LP més ràpid que el SIMPLEX. Aquest mètode ha estat ampliat més recentment per altres autors (Alder et al., 1989, MacDonald i Hrymak, 1991) en diferents tècniques anomenades de punt interior ja que, contràriament al SIMPLEX, tenen com a punt de partida un punt intern de la regió factible.

Optimització discreta

Molts problemes vénen descrits per models que necessiten de variables binàries o enteres per representar decisions discretes del tipus sí o no o quants/quantes respectivament. Aquests problemes s'anomenen també d'optimització combinatoria degut a l'arbre de possibilitats que implica la presa de totes les decisions. La dificultat essencial d'aquest tipus de problemes rau en la seva discontinuïtat. La conseqüent inexistència de condicions d'optimalitat pot fer

inevitable l'exploració de tots els casos possibles per comprovar la seva factibilitat i comparar-ne els valors de la funció objectiu.

Un cas particular d'aquest tipus de problemes és aquell en el qual totes les variables del problema estan restringides a prendre valors sencers. En aquest cas es parla de problemes de programació entera estricta, PIP (*Pure Integer Programming*). Tanmateix, moltíssimes aplicacions d'interès s'adscriuen a aquest tipus de problemes: problemes d'assignació, de xarxes, de localització de serveis, etc. Són especialment rellevants per la seva generalitat un parell de problemes model:

- El problema de la motxilla (*Knapsack problem*). Consisteix en seleccionar un conjunt d'objectes de diferent valor (a_i) i diferent pes (b_i) per tal de maximitzar el valor de la càrrega total resultant (z) sota la restricció que no és possible que aquesta càrrega total sobrepassi un cert pes límit (B). El problema es formula:

$$\max z = \sum_i a_i x_i \quad (2.7)$$

subjecte a:

$$B \leq \sum_i b_i x_i \quad (2.8)$$

$$x_i \in N \quad (2.9)$$

i la seva dificultat rau precisament en la restricció que les variables només poden prendre valors discrets. Altrament, la solució òbvia fóra omplir la motxilla exclusivament amb la substància de major relació valor/pes (a_i/b_i) fins satisfer exactament la restricció de màxim pes.

- El problema del viatjant, TSP (*Travelling Salesman Problem*). Consisteix en decidir l'ordre en el qual cal visitar un conjunt d' n ciutats per tal de minimitzar la distància recorreguda en visitar-les totes i no repetir-ne cap. Anomenant a_{ij} al conjunt de distàncies el problema es formula:

$$\min z = \sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \quad (2.10)$$

subjecte a:

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad ; \quad \sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.11)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \quad (2.12)$$

La dificultat d'aquest problema resideix en l'elevadíssim número de situacions a explorar ($n!$) tant si es pensa en l'arbre de possibilitats com si es pensa en els vèrtex de la regió

factible. El mateix tipus de problema és el que s'obté al plantejar el problema de seqüenciar diferents treballs en una màquina o una línia de producció.

Ambdós problemes es poden resoldre ràpidament mitjançant algoritmes heurístics. Les decisions s'ordenen per prioritats (major quocient valor/pes per a la motxilla i menor distància per la TSP) i es prenen en aquest mateix ordre o bé es descarten en funció de l'acompliment de les restriccions. Aquest tipus d'algoritmes s'anomenen avars (*greedy*) pel fet que no poden preveure les conseqüències de les decisions preses a cada pas i que postser defineixen un camí que finalment s'allunyarà de l'òptim. Mètodes més sofisticats es poden trobar en textos com els de Nemhauser i Wolsey (1988).

Tanmateix, en moltíssimes situacions l'enumeració explícita de tots els casos possibles continua constituint l'únic mètode realment fiable (Garfinkel, 1994). Malgrat la creixent potència de càlcul dels ordinadors, aquesta enumeració no sempre és factible. És per aquest motiu que darrerament han aparegut mètodes que executen aleatòriament enumeracions parcials sota regles de selecció de les millors opcions obtingudes a cada pas. Tant els algoritmes genètics (*Genetic Algorithms*, GA, Holland, 1992) com els mètodes de recuita simulada (*Simulated Annealing*, SA, Kirkpatrick et al., 1983) han demostrat donar bons resultats en determinats problemes.

El cas general és el problema mixte MIP (*Mixed Integer Programming*) amb variables contínues i senceres. És corrent fer la distinció entre problemes MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) que són estrictament lineals i problemes MINLP (*Mixed Integer Non Linear Programming*) que no ho són. Les no linealitats, però, s'acostumen a considerar només als termes amb variables contínues i, en cas contrari, les tècniques generals de resolució existents sovint resulten ineficients o inaplicables.

Una primera temptativa per a la resolució de problemes MILP o MINLP podria consistir en resoldre sistemàticament tots els problemes LP o NLP, respectivament, derivats de totes les combinacions factibles de variables discretes per tal d'escollir finalment la solució amb millor funció objectiu. Aquesta opció, però, és computacionalment inviable tenint en compte que un problema senzill amb 10 variables binàries implica la resolució de $2^{10} = 1024$ problemes de programació contínua.

Una segona alternativa és el relaxament de les variables enteres, que es consideren contínues entre les seves cotes ($0 \leq x_i \leq 1$, per exemple, per a les variables binàries). Així s'obté una aproximació no entera a la solució del problema. Tot i així, l'arrodoniment als valors sencers més propers podria conduir, fins i tot per exemples senzills, a resultats clarament incorrectes (Grossmann et al., 1992) per la qual cosa es fa necessari explorar explícitament tot l'entorn de la solució no entera obtinguda. Això pot resultar molt útil per reduir problemes, les variables enteres dels quals poden prendre molts valors diferents, a problemes binaris, però

l'esforç és estèril per als problemes binaris que constitueixen una gran majoria dels problemes d'interès.

La ramificació i acotació (*Branch and Bound*, B&B) és la tècnica més comuna de resoldre rigorosament aquests problemes. Aquest mètode, proposat inicialment per Land i Doig (1960) i formalitzat posteriorment per Dakin (1965), té per objectiu aconseguir una enumeració completa sense necessitat d'avaluar totes les combinacions enteres. La idea bàsica d'aquest procediment és partir de la solució relaxada del problema i començar seguidament l'arbre de combinacions. A cada pas, s'escull una nova variable entera i es resolen els subproblemes relaxats (semirelaxats) que s'obtenen fixant tots els valors possibles d'aquesta variable.

El procediment implica en principi l'avaluació de totes les possibilitats. Tanmateix, és possible eliminar determinades opcions tenint en compte que es pot garantir:

- Si un problema semirelaxat és infactible els subsegüents problemes també ho seran i no cal continuar ampliant l'arbre.
- Qualsevol solució relaxada o semirelaxada és millor que qualsevol solució entera factible que se'n pugui derivar i es pot considerar una cota del problema. Quan una solució relaxada és pitjor que la cota del problema no cal examinar les combinacions subsegüents.
- Quan, en arribar a una solució relaxada on totes les variables enteres prenguin valors enters es pot afirmar que s'ha assolit l'òptim.

L'eficiència del procediment depèn fortament de la qualitat de la cota inferior que s'aplica als subproblemes. Com més acurada sigui una cota més nodes és possible descartar amb la qual cosa s'accelera el procediment d'optimització. També, però, és important que el problema relaxat atorgui a les variables binàries valors inicials propers a zero o a u, per tal que en els procediments de ramificació es puguin discriminar els nodes.

Si bé els problemes MINLP es poden resoldre igualment seguint un B&B, el fet que en cada node sigui necessari resoldre un NLP els fa molt més costosos quan a temps de càlcul. Cal fer esment principalment de dos mètodes adreçats a superar aquest inconvenient: el GBD (*General Benders Decomposition*, Geoffrion, 1972) i l'OA (*Outer Approximation*, Duran i Grossmann, 1986). La idea bàsica d'ambdós mètodes és la solució alternada d'una seqüència de subproblemes NLP i MILP. Els problemes MILP consisteixen en aproximacions lineals que permeten la predicció de nous valors de les variables binàries i l'obtenció de noves cotes per a la solució òptima.

Finalment, cal esmentar el fet que l'aproximació a la solució relaxada d'un problema MIP es pot prendre com l'objectiu d'un B&B i així mesurar la convergència del procés cap a l'òptim en funció d'aquesta proximitat. En cas que l'obtenció de l'òptim requereixi molt temps de càlcul es possible limitar el número d'iteracions fixant una convergència acceptable. Tot i així, fixar un paràmetre de convergència sovint no resulta trivial degut al desconeixement del salt entre la solució relaxada i la millor solució entera.

2.3. Revisió bibliogràfica.

El número d'articles dedicats a l'optimització dels processos químics discontinus i de les plantes on tenen lloc ha experimentat un gran creixement des dels primers anys 70 ençà. Malgrat tot, encara no ha estat publicat cap llibre de text que reculli els principis d'aquesta matèria. Cal fer esment, però, de l'edició especial que una revista especialitzada dedicà a les aplicacions informàtiques per processos químics discontinus (Georgakis i Preston, 1989), de bona part del llibre de Mah (1990) sobre teoria de grafos i del capítol referent al processament per lots d'un llibre d'aplicacions de la investigació operativa en enginyeria de disseny (Biegler et al., 1987).

També són remarcables els *proceedings* d'un *Nato Advanced Study Institute* sobre enginyeria de sistemes de processament per lots la publicació dels quals tindrà lloc aviat (Reklaitis et al., 1992). Finalment, hom sempre pot disposar d'excel·lents articles de revisió (*reviews*). Entre els més actuals cal destacar el de Rippin (1993) sobre enginyeria de processos discontinus. Els de Reklaitis (1992) i de Ku i col.laboradors (1987) que tracten més concretament la programació d'operacions i el de Musier i Evans (1990), que complementa els aspectes acadèmics amb els de la innovació industrial.

Campanyes monoproducte

El problema plantejat inicialment fou el de la determinació de les capacitats òptimes dels equips d'una BCPI. Els primers passos es dirigeixen al cas multiproducte i es fonamenten en el mode d'operació en campanyes monoproducte úniques executades correlativament. Degut al seu caràcter periòdic, aquestes campanyes poden ser caracteritzades per la seva productivitat (el quocient entre la dimensió de cada un dels lots i el temps de cicle, B/T). La duració de cada una de les campanyes d'un sol producte resulta de dividir la demanda que cal cobrir entre aquesta productivitat. Finalment, el contrast entre el temps total necessari per cobrir la demanda de tots els productes (la suma de totes les duracions) i l'horitzó de temps disponible permet la comprovació de qualsevol disseny proposat.

Els treballs pioners de Loonkar i Robinson (1970) i Robinson i Loonkar (1972) es basen en aquestes idees i presenten mètodes de càlcul de les dimensions dels equips per al cas de plantes monoproducte i multiproducte amb un únic equip per a cada etapa de procés. El mateix tractament el segueixen treballs posteriors, els quals han anat presentant metodologies més acurades per tal de resoldre el problema de manera cada vegada més detallada.

Sparrow i col.laboradors (1974) presentaren un primer paquet informàtic per a la comprovació del funcionament d'una planta multiproducte. Aquest paquet, que contemplava dimensionat dels equips, balanços de matèria i energia, utilització en el temps de la capacitat dels equips i anàlisi econòmiques, va ésser utilitzat en un treball posterior com a eina per al disseny de plantes multiproducte (Sparrow et al., 1975). El treball considera l'operació d'equips en paral·lel i restringeix les seves dimensions a un conjunt finit i discret de volums disponibles que eren examinats per un procediment de ramificació i acotació (*Branch and Bound, B&B*).

Grossmann i Sargent (1979) varen formular el mateix problema en forma de programació no lineal mixta (MINLP) per tal de resoldre'l exactament mitjançant tècniques de programació matemàtica. Si bé el seu treball contemplava les possibilitats d'operació fora de fase, els volums dels equips es tornaven a considerar variables contínues. El temps de càlcul que es necessitava per a la resolució del problema era significativament més elevat que el que consumia el mètode d'Sparrow.

Knopf i col.laboradors (1982) van incloure el cost dels equips semicontinus en l'optimització del disseny de la planta. La consideració de les possibilitats d'emmagatzemament intermig durant el dimensionat dels equips fou considerada per Takamatsu i col.laboradors (1982) per al cas d'un sol producte. Karimi i Reklaitis (1985) varen introduir algorismes per al càlcul de la capacitat de l'emmagatzemament necessari i Yeh i Reklaitis (1987) presentaren procediments heurístics per a l'optimització simultània del dimensionat dels equips i la localització de l'emmagatzemament. El cost de l'emmagatzemament era inclòs en un altre procediment heurístic ideat per Modi i Karimi (1989).

Emmagatzemament intermig

Per la seva part, l'optimització de l'operació de les BCPI amb emmagatzemament intermig ha de contemplar la situació real de l'emmagatzemament finit (*Finite intermediate storage, FIS*) i les conseqüents restriccions en les possibilitats d'emmagatzemament. Aquestes restriccions es deuen tant a la capacitat limitada dels dipòsits com al fet que diferents intermedis necessitin compartir aquests tancs. Certament, la programació òptima de les operacions considerant IS constitueix ja un problema de limitació de recursos i un primer pas vers el cas general RCSP (*Resource constrained scheduling problem*).

Antecedents

Una de les primeres contribucions a l'estudi dels problemes de programació amb FIS es deu a la investigació operativa. Dutta i Cunningham (1975) van definir la capacitat d'emmagatzemament en un número sencer de lots i van resoldre així un sistema de dues màquines amb un algoritme exacte però molt costós en termes de temps de càlcul. Posteriorment, Papadimitriou i Kanelakis (1980) reduïren aquest temps emprant tant procediments exactes com aproximats.

Wiede i Reklaitis (1981) varen ampliar la solució del problema al cas de múltiples etapes de procés i, posteriorment, a la consideració de polítiques d'emmagatzemament mixtes, MIS (Mixed intermediate storage). També considerant MIS, Ku i Karimi (1990) desenvoluparen algoritmes per a la minimització del makespan en casos multiproducte i Kuriyan et al. (1987) assoliren el mateix objectiu tractant l'emmagatzemament de quantitats variables de producte intermedi a costa, però, de retornar la problema de les dues etapes de procés.

La inclusió dels dipòsits d'emmagatzemament en la modelització de la planta ha portat a l'estudi d'un problema relacionat: l'enllaç de processos contius i discontinus mitjançant dipòsits d'emmagatzemament que actuïn de pulmó i ajustin ambdues productivitats (Djavdan, 1992, Tersptra et al., 1994).

Campanyes multiproducte

Birewar i Grossmann (1989) proposaren la inclusió de l'operació en campanyes multiproducte en els procediments de disseny de la planta per tal de reduir-ne el cost. Aquesta consideració resulta positiva només quan les campanyes multiproducte suposen un estalvi de temps respecte les uniproducte (sense oblidar els temps addicionals per canvi de producte). El treball posava de manifest la decisiva influència del futur mode d'operació de la planta en el seu disseny òptim. Un estudi posterior (Graells et al., 1991) emprava un procediment en el qual el disseny òptim s'assolia mitjançant un mòdul de planificació que retroalimentava iterativament el mòdul de disseny encarregat del càlcul dels dimensionaments dels equips.

Campanyes de productes compatibles

Suhami i Mah (1982) van plantejar la resolució simultània del disseny i el mode de producció òptims de plantes en les quals existien productes les receptes dels quals no presentaven cap equip en comú i que anomenaven plantes multipropòsit. La resolució es portava a terme amb un procediment parcialment heurístic que examinava les diferents possibilitats de produir paral·lelament i alhora el màxim número d'aquests productes. Aquest és un problema de partició de conjunts, tal i com observaren Klossner i Rippin (1984) que també el van estudiar i resoldre. El mateix plantejament ha estat seguit posteriorment per molts altres autors (Vaselenak et al., 1987, Faqir i Karimi, 1989 i 1990, Cerdà et al., 1989 i 1990, Henning et al., 1991 i Papageorgaki i Reklaitis, 1991).

La cerca exclusiva de campanyes de productes, però, és una opció massa restringida. No és difícil, d'altra banda, trobar contraexemples senzills on productes que comparteixen equips no limitants poden operar gairebé independentment i amb millors resultats que si es prescindís d'algun equip per tal que la independència fos completa. Aquest treball de tesi en presenta alguns.

Programació d'operacions i planificació de la producció

La planificació multiproducte es pot resoldre mitjançant la determinació de la duració de les diferents campanyes i l'ordre en el qual se seqüencien. El disseny de plantes s'ha basat en la duració d'aquestes campanyes tant en el cas estrictament multiproducte com en el cas de plantes de caire més multipropòsit que operen (es fan operar) en campanyes de productes compatibles.

La planificació multipropòsit implica la selecció entre diferents campanyes alternatives d'aquelles que són més adequades per cobrir les necessitats de producció en cada moment. Les diverses campanyes alternatives han de reflectir les diferents possibilitats d'assignació de tasques a grups d'equips que són inherents a la flexibilitat d'una instal·lació multipropòsit. Malauradament, aquesta flexibilitat es veu fortament minvada en moltes de les aproximacions que es fan al problema.

Els models de planificació proposats per Suhami i Mah (1984), Rich i Prokopakis (1986) accepten que cada producte utilitza un conjunt d'equips preestablert i assumeixen dimensions de lot i temps de procés fixes. Això condueix a la consideració d'una sola línia de producció per cada producte i, conseqüentment, a un únic valor possible de la seva productivitat. Si bé això simplifica notablement el problema cal admetre que és a costa de menystenir precisament la flexibilitat que s'espera d'una planta multipropòsit. L'encert d'ambdós treballs és la consideració de les dates de lliurament pels productes finals i el correcte tractament de la gestió dels productes intermedis i les seves relacions de precedència.

De fet, és la complexitat del problema multipropòsit la causa de l'actual dicotomia que s'observa en les metodologies de solució que es presenten. Els treballs que han intentat portar fins les últimes conseqüències les possibilitats de la programació matemàtica (LP MINLP) s'han hagut de conformar amb problemes acadèmics o relativament limitats. Problemes cada vegada més grans, però, són accessibles als nous mètodes de càlcul i a la creixent potència dels ordinadors.

D'altra banda, els treballs que s'han enfrontat amb problemes pràctics a gran escala han acabat emprant tècniques heurístiques, o parcialment heurístiques, basades en regles de prioritat i en criteris marcats per l'experiència adquirida en cada cas concret. En el cas de la planificació línies contínues multiproducte operant en paral·lel es troba el mateix contrast

Antecedents

d'enfocs entre els treballs de Sahinidis i Grossmann (1989a,b), que planteja problemes MINLP de grans dimesions, i de Abad et al. (1991) que proposa tècniques heurístiques confeccionades *ad-hoc* per a la resolució d'un cas concret (producció de fibra acrílica).

Procediments jeràrquics

El problema complet de la planificació de la producció i la programació de les operacions d'una planta multipropòsit es pot descomposar en tres subproblemes (Mauderli i Rippin, 1979):

- Planificació de la producció emprant un conjunt reduït de possibles campanyes alternatives.
- Generació del conjunt de campanyes alternatives a partir del conjunt d'equips disponibles.
- Programació de les operacions de les línies de producció monoproducte que componen les campanyes.

Segons Reklaitis (1992) només tres treballs han abordat el problema multipropòsit abastant totes tres facetes: el de Mauderli i Rippin (1979), el de Lázaro i Puigjaner (1985) i el de Wellons i Reklaitis (1991). Tots tres amb importants limitacions.

L'estudi precursor de Mauderli i Rippin (1979) enumerava totes les possibles disposicions d'equips, suposant un sol grup d'equips (en fase) per etapa. Després de l'eliminació de les clarament ineficients, totes les possibles línies de producció monoproducte eren generades com a resultat de totes les combinacions de disposicions. L'explosió combinatòria implicada en aquest procés es controlava heurísticament. La productivitat de les línies de producció es calculava suposant espera nul·la (ZW), assignant les dimensions dels lots a la màxima capacitat possible i seqüenciant arbitràriament els grups d'equips de cada etapa.

Un mètode enumeratiu permetia Mauderli i Rippin l'obtenció d'un gran nombre de campanyes monoproducte i multiproducte el qual es podia reduir al conjunt de campanyes dominants (linealment independents) mitjançant un problema LP. La planificació de la producció consistia finalment en la distribució, atenent la demanda, de les campanyes dominants entre el conjunt de períodes en què es dividia l'horitzó de temps disponible. Aquest problema MILP es coneix com el problema de les motxilles múltiples (*multiple knapsack problem*).

Les limitacions que presenta el treball de Mauderli i Rippin (1979) es resumeixen en els punts següents:

- La política d'emmagatzemament és molt restrictiva (ZW).

- El control heurístic que es fa de l'enumeració parcial no ofereix garanties que el conjunt de campanyes pressumptament dominants ho sigui realment.
- La selecció de campanyes depèn de les productivitats de les línies de producció associades les quals no són determinades de manera òptima.
- No es considera la pèrdua de producció per *start-up* i s'assumeix que els temps de canvi entre productes són constants. La sobreestimació de les productivitats de les campanyes que això implica podria conduir a plans de producció infactibles.

El mètode de Lázaro i Puigjaner (1985) consisteix en una enumeració exhaustiva de totes les línies de producció monoprodacte i en la posterior selecció de les millors, que s'anomenen dominants, segons els valors que pren un índex heurístic que contempla productivitat de la línia, percentatge d'utilització dels equips i cost de producció unitari del producte final. La planificació de la producció es resol seguidament per cada producte determinant directament el número de lots que cal produir en cada línia durant cada un dels períodes. La factibilitat del pla es comprova mitjançant la programació de les operacions corresponents i així es pot obtenir de manera iterativa un pla final factible.

La seqüenciació i programació de les operacions en cada línia i període es realitza seguint una heurística clàssica de la investigació operativa (Baker, 1974). L'algoritme permet el tractament de restriccions en els consums de mà d'obra i de serveis generals. El problema que es resol és, doncs, un problema de programació amb restriccions de recursos (*Resource constrained scheduling problem*, RSCP) i això constitueix un èxit del mètode de Lázaro i Puigjaner. Tanmateix, a l'assimilar la planta a un *job-shop* apareixen greus limitacions:

- Es considera capacitat d'emagatzemament infinita per tots els intermedis estables (política UIS) que només és una descripció acurada en casos molt particulars.
- No es considera l'operació d'equips fora de fase i això pot representar un retall significatiu d'eficiència.
- Es perd o minva notablement el concepte d'operació en campanya, la qual cosa pot dificultar la implementació pràctica dels plans resultants.

A les quals cal afegir que:

- L'elecció de línies per cada producte es fa segons un principi avar (*greedy*) basat en l'índex de selecció i la cerca de bones solucions es pot veure compromesa per males decisions inicials.

Wellons i Reklaitis (1991) varen desenvolupar més recentment un mètode per a la solució rigorosa del problema plantejat per Mauderli i Rippin. La generació de les millors campanyes

Antecedents

monoproducte s'efectua a través de la resolució d'un problema MINLP que té com a objectiu la maximització de la productivitat. Aquestes campanyes serveixen per a la posterior generació de les campanyes multiproducte mitjançant un nou problema MINLP i la reducció final al conjunt de campanyes dominants es realitza segons un problema LP tal i com indicaren Mauderli i Rippin. El problema de la formació de campanyes considera:

- L'operació de grups d'equips diferents.
- Polítiques d'espera nul·la i espera infinita (ZW i NIS).
- Operacions de transferència mitjançant equips semicontinus.
- Temps de procés i transferència depenents de les dimensions dels lots.

i, en canvi, desestima:

- Reutilització d'equips dins d'una mateixa línia de producció.
- Emmagatzemament intermig.
- Etapes de concentració o dispersió de la producció.

La solució rigorosa de Wellons i Reklaitis (1991) al problema plantejat per Mauderli i Rippin (1979) demostra l'encert parcial dels mètodes heurístics desenvolupats inicialment pels darrers. Nogensmays, el grau d'encert no és fàcilment quantificable i les comparacions poden venir acompanyades de certes dosis de subjectivitat (Reklaitis, 1992 i Rippin 1993).

En el seu *review*, Reklaitis (1992) reconeix les limitacions d'aquestes tres importants contribucions. Primerament, cap dels mètodes inclou explícitament la decisió de com subdividir la producció d'un producte en la producció de diferents intermedis la producció dels quals cal programar. En segon lloc, l'estructura de línies de producció individuals no permet la inclusió de dipòsits d'emmagatzemament intermig que permetrien considerar diferents dimensions de lot al llarg de la recepta. Finalment, la construcció de campanyes dominants esdevé un escull per abordar un RCSP ja que caldria determinar diferents conjunts d'aquestes campanyes pels diferents nivells de limitacions recursos que es podrien donar en el temps.

Discretització del temps

Kondili et al. (1988) van proposar nou enfoc per al problema de la programació i planificació que permetia, en principi, tractar tant el problema de l'emmagatzemament (IS) com el dels recursos (RCSP). Primerament, introduïren l'STN (*state task network*) com una eina conceptual per a la descripció de l'estat de la planta comparable al *flowsheet* que s'utilitza per

als processos continus. En segon lloc, formularen la programació d'operacions com problemes de programació matemàtica (MILP) basant-se en la descripció oferta per l'STN i la discretització de l'horitzó de temps.

Alguns autors veuen inevitable la discretització del temps quan els processos que es tracten no presenten cap tipus de periodicitat (Reklaitis, 1992). Així doncs, tant en el treball de Kondili et al. com en una sèrie d'estudis posteriors que adopten la mateixa concepció (Kondili et al., 1992, Shah et al., 1992, Rapacoulias et al., 1991, Papageorgiou i Pantelides, 1992), l'horitzó de temps disponible es descriu com una successió regular d'interval·ls de temps en els quals tenen lloc o no les diferents activitats. L'assignació de cada esdeveniment possible (tasca i , equip, j) a un quantum de temps (t) es fa mitjançant variables binàries del tipus W_{ijt} . Tant les variacions de les demandes de serveis generals com les dels nivells d'ocupació dels dipòsits d'emmagatzemament intermig es poden definir i acotar en funció del temps.

El plantejament és conceptualment correcte i sembla oferir grans possibilitats. Tanmateix, presenta serioses limitacions de partida i dificultats d'aplicació. Els inicis i acabaments de les operacions han de coincidir amb l'inici i l'acabament dels quantums corresponents per tal de que l'assignació d'esdeveniments (ij) a moments (t) sigui unívoca (si/no). Per tant, la correcta descripció del funcionament d'una planta només és possible si la durada de totes les operacions que hi poden tenir lloc és mesurable amb un número sencer de quantums de temps. Tenint en compte que la discretització de l'horitzó de temps s'assumeix uniforme, la dimensió òptima dels quantums de temps ha de ser el màxim comú divisor de totes les operacions possibles.

Una greu limitació sorgeix del fet que la discretització del temps és un pas previ de la solució del problema. El mètode es veu forçat a fixar els temps d'operació i a admetre que són independents de les quantitats processades per tal de determinar el MCD de tots els temps d'operació possibles amb antelació a la programació d'aquestes operacions. La descripció que s'obté de les operacions discontinües i, sobretot, semicontínues és del tot insatisfactòria. De la mateixa manera, els factors depenents de la seqüència, com ara penalitzacions de temps de preparació i neteja degudes als canvis de producte, només són tractables després d'incloure un gran número de restriccions addicionals.

Les dificultats d'aplicació resulten del gran número de variables binàries que es poden veure implicades i que poden convertir en intractables problemes de dimensions modestes. El número de variables binàries W_{ijt} necessàries és inversament proporcional a la mida dels quantums de temps que determina el MCD de tots els possibles temps d'operació. Fins i tot havent fixat aquests temps, els seus valors no tenen perquè conduir a MCD precisament grans. D'altra banda, en augmentar la complexitat dels problemes (equips alternatius de

Antecedents

capacitats i temps diferents, etc.) els possibles temps d'operació també augmenten i minva, molt probablement, el seu MCD.

Zetner i Reklaitis (1991a,b) proposaren la superació d'aquestes dificultats mitjançant la discretització de l'horitzó de temps en quantums de temps de mida variable. La hipòtesi de temps de procés constants es manté. La idea, però, només ha estat continuada en un treball dels mateixos autors (Zetner i Reklaitis, 1992).

Determinació *versus* incertesa

Tots els estudis referenciats fins aquest punt i també aquest treball de tesi interpreten el problema de la programació d'operacions i planificació de la producció de forma determinista. Pel que fa a la programació, les variables d'operació (temps, capacitats, etc.), o les funcions que en permeten el càlcul, se suposen *a priori* perfectament conegudes i invariables. També s'obvien totes les incidències que poden succeir i la seva repercussió sobre el mode d'operació que ha estat previst. Quant a la planificació, s'assumeix la certesa i invariabilitat dels perfils de demanda que defineixen el problema.

Si bé és necessari un punt de partida, que és el que intenten subministrar les metodologies fins ara exposades, és cert que un programa d'operacions desenvolupat d'antuvi pot esdevenir ineficient o fins i tot no factible a partir del moment de l'execució del programa en el qual apareixen desviacions imprevistes en els paràmetres de la planta. La solució tradicional d'aquest problema consisteix en la reprogramació estàtica de les operacions que resten després que qualsevol incidència en una operació determinada hagi estat resolta mitjançant decisions preses per l'operador.

L'objectiu de la programació reactiva (*reactive scheduling*) és la modificació del programa d'operacions original per tal de contemplar la incidència i, al mateix temps, reduir l'impacte d'aquesta modificació sobre la resta d'operacions ja programades. Els estudis en aquest camp són realment incipients, però cal fer esment dels treballs de Cott i Machietto (1989) i Kanakamedala et al. (1994).

L'opció de considerar la incertesa associada a alguns paràmetres de planta i/o externs (incertesa en la demanda, manteniment dels equips, etc.) durant l'etapa de programació també ha estat indicada en alguns treballs en un intent de maximitzar la fiabilitat del programa d'operacions (Sanmartí et al., 1995).

MODELITZACIÓ

3. MODELITZACIÓ

En aquest capítol s'exposa la formalització matemàtica del model adoptat per a la descripció de l'operació de les BCPIs. Aquesta formalització és necessària per la definició acurada de l'objecte d'estudi i és l'única via per intentar la resolució rigorosa del problema mitjançant la programació matemàtica.

3.1. Seqüenciació i programació

La recepta conté l'ordre i la descripció de les tasques necessàries per a l'elaboració d'un producte. Cada tasca es compon del conjunt d'etapes químiques i físiques, les diferents subtasques, que cal executar consecutivament en un mateix equip o grup d'equips. L'equip o els equips on és possible dur a terme cada una de les tasques, i la subsegüents factibilitat de les rutes de producció, vénen descrits per una variable binària x_{ijm} :

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1 & \text{si la tasca } j \text{ del producte } i \text{ pot fer-se a la unitat } m \\ 0 & \text{altrament} \end{cases} \quad (3.1)$$

Els requeriments dels diferents recursos (temps, equips, serveis generals...) també necessiten ser especificats:

- Els factors de capacitat, S_{ijm} , que acoten la dimensió de cada un dels lots.
- Els temps d'estabilitat màxims, TW_{ijm}^{\max} , per a cada producte, tasca i equip.
- La durada de cada una de les operacions, expressada en funció de la càrrega processada (B) i de les penalitzacions de preparació i neteja.
- Les necessitats de consums de serveis generals, expressades en funció de la càrrega processada (B) i de les penalitzacions de preparació i neteja.

La definició de recepta adoptada ja comporta implícitament algunes de les suposicions que s'admeten en aquesta modelització:

- No es consideren rutes de producció ramificades. Això significa que no hi ha etapes que concentrin o dispersin la producció.
- No es consideren possibles restriccions de connectivitat. Els equips que es poden usar consecutivament se suposen adequadament connectats.

a les quals cal afegir:

- Només es consideren restriccions de potència en els serveis generals renovables. La descripció dels serveis generals no renovables i la corresponent previsió d'aprovisionament es també possible però no així la restricció que imposaria la manca d'aprovisionament.

Descripció de les operacions: subtasques.

Una descripció detallada de l'operació de les plantes químiques de funcionament discontinu ha de contemplar:

- els processos de transferència entre etapes discontinues (càrrega i descàrrega i altres operacions en continu) que es duen a terme en les corresponents unitats semicontínues.
- els possibles treballs de preparació i neteja dels equips que dependran, quan a temps i cost, de la seqüència de productes.
- els diferents temps d'espera que poden suportar els diferents productes intermedis dins dels equips en els quals han estat generats i que vénen acotats per les estabilitats d'aquests productes intermedis.

Això és possible mitjançant la consideració de subtasques. El model que es proposa considera cinc subtasques elementals. Tot i la generalitat d'aquestes subtasques el model és fàcilment ampliable per tal d'incorporar nous tipus de subtasques la consideració de les quals esdevingués necessària en determinats casos particulars. La figura 3.1 il·lustra la descripció mitjançant aquestes subtasques de la càrrega, mitjançant la bomba BOMBA_1, dels equips discontinus diferents REACTOR_1 i REACTOR_2 que treballaran en fase. Després de diferents temps d'operació, la inclusió de diferents temps d'espera permet la descàrrega simultània dels dos equips sobre el següent mitjançant la bomba BOMBA_2.

Diferents equips (m), cada un dels quals s'utilitza per k -èssima vegada, pot contribuir a dur a terme la tasca j -èssima de la recepta del producte i en l' n -èssim dels lots seqüenciats. L'esdeveniment k_m està constituït pel conjunt de les contribucions elementals, les subtasques, que s'inicien a temps TI_{k_m} i finalitzen a temps TF_{k_m} . La figura 3.2 mostra la manera com la consideració d'aquest conjunt de subtasques permet una descripció més detallada i fidel dels processos.

Les tasques discontinües i semicontínues es distingiran pel paràmetre binari z_{ij} . Les tasques discontinües s'identificaran amb $z=0$ i les semicontínues amb $z=1$. Per tal de garantir temps de transferència no nuls s'imposa que totes les tasques discontinües es trobin sempre entre tasques semicontínues. Es defineix, així, el conjunt F_{ij} com el de les etapes de la recepta d'un producte i determinat l'operació de les quals és simultània. El conjunt F_{ij} conté únicament l'etapa discontinüa j si aquesta és discontinüa. Si j és una tasca semicontínua, llavors F_{ij} correspon al conjunt d'etapes semicontínues que acompanyen j entre els equips discontinus anterior i posterior i que s'anomena subtren semicontinu.

$$F_{ij} = \left\{ j' \mid \max_{\varphi} \{ \varphi < j \mid z_{i\varphi} \neq z_{ij} \} < j' < \min_{\varphi} \{ \varphi > j \mid z_{i\varphi} \neq z_{ij} \} \right\} \quad (3.2)$$

Descripció dels consums de serveis generals.

La limitació dels serveis generals representa una important restricció al problema que es planteja que cal tenir en compte. Les demandes d'aquests serveis es consideren rectangulars. D'aquesta manera, la demanda v -èssima del servei u durant la subtasca s comença a temps TI_{kmsuv}^w i es considera constant fins al seu acabament a temps TF_{kmsuv}^w (Fig. 3.1).

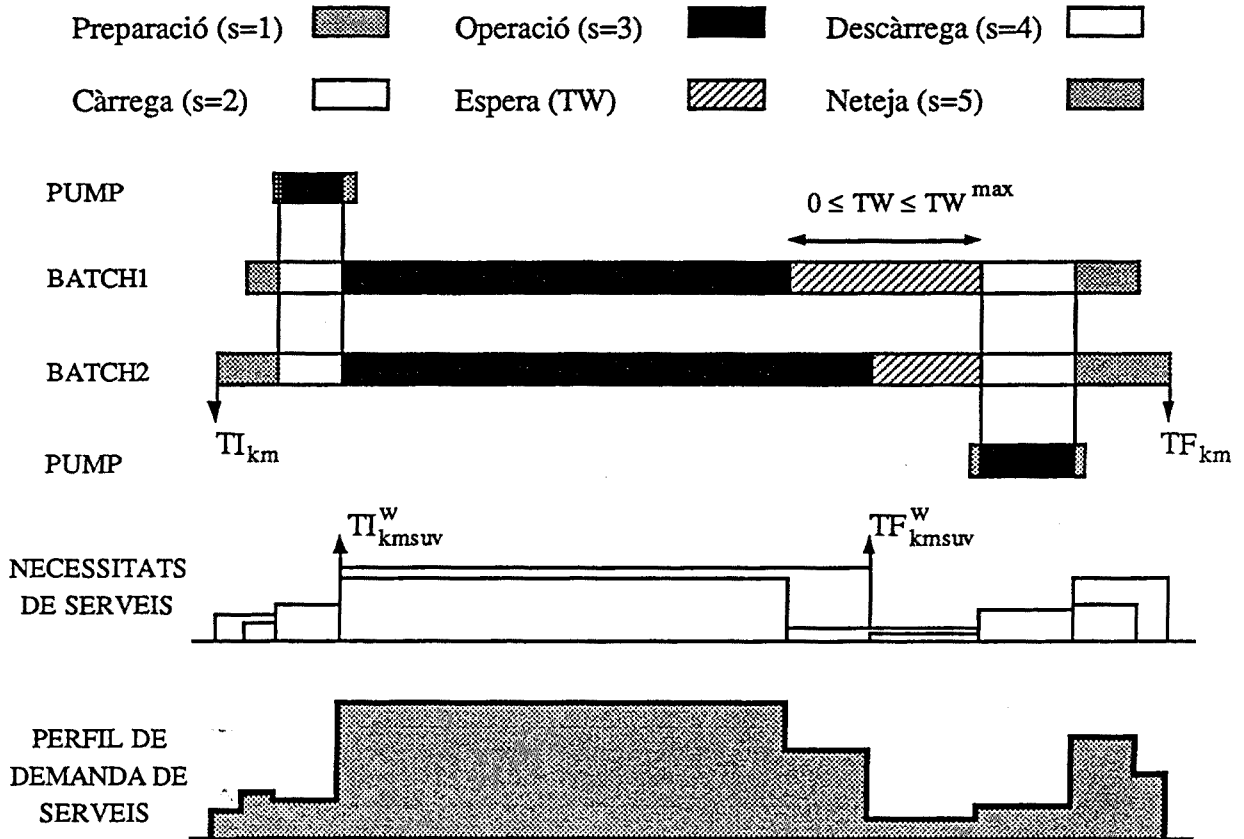


Fig. 3.1. Descripció de les operacions.

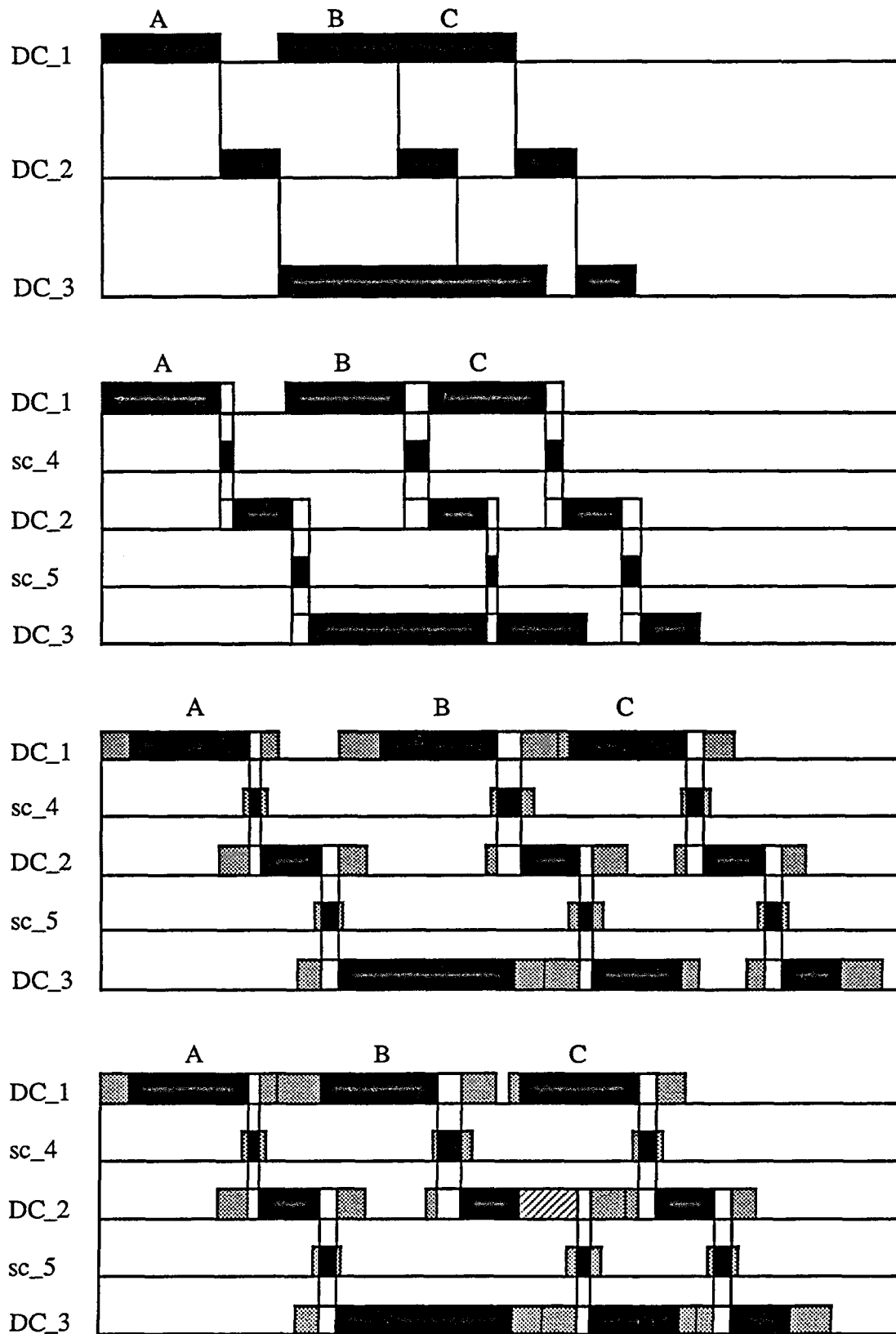


Fig. 3.2. Efecte de les subtasques i del temps d'espera TW.

3.1.1. Model multiproducte

El cas multiproducte és aquell en el qual productes semblants segueixen rutes de fabricació úniques i similars. Per a la formulació matemàtica d'un model es parteix d'una definició rigorosa que implica un cas molt restringit. Es considera que el model multiproducte descriu els casos en els quals:

- Tots els equips m veuen la mateixa seqüència de tasques/producte ij amb la garantia que els temps d'aquestes tasques no poden ser nuls.

la qual cosa es pot expressar matemàticament mitjançant les següents restriccions en x_{ijm} :

$$\sum_{m=1}^M x_{ijm} = 1 \quad ; \quad \sum_{j=1}^J x_{ijm} = 1 \quad ; \quad \sum_{i=1}^I x_{ijm} = I \quad (3.3)$$

Aquestes condicions garanteixen que:

- Les receptes de cada producte tenen el mateix número de tasques ($J_i = M \forall i$).
- Cada tasca està assignada a un únic equip i cada equip a una única tasca de manera que la formulació del model pot prescindir de fer esment dels equips. (En el diagrama de Gantt, k vs. m pot ser substituït per j vs. n)

$$TI_{km}, TF_{km}, TW_{km} \rightarrow TI_{jn}, TF_{jn}, TW_{jn} \quad (3.4)$$

- L'única diferència entre les distintes receptes rau en la dimensió del lot i els temps d'operació.
- Existeix una seqüència de lots perfectament definida descrita per una variable binària que relaciona el número d'ordre dels lots amb el producte corresponent.

$$Y_{in} \in \{0,1\} \quad \forall i,n \quad (3.5)$$

- L'ordre d'entrada dels lots (en el diagrama de Gantt, és dir, en el temps) ha de ser el mateix que el de sortida.
- A temps t només és possible una única tasca j i, conseqüentment, a temps t només és possible començar a produir un únic producte i .

Partint de tot això és possible construir un model consistent que permeti la descripció completa de l'operació de la planta considerant només:

- Les receptes dels diversos productes (DADES).
- El número de lots N (VARIABLE).
- L'assignació de productes a cada un dels lots de la seqüència Y_{in} (VARIABLE).
- Les dimensions de cada un d'aquests lots B_n (VARIABLE).
- Els temps en els quals s'inicien cada una de les operacions TI_{jn} (VARIABLE).

La simplicitat d'aquest model es basa en la informació implícita que proporciona l'existència d'una única ruta de fabricació possible per a tots els productes. La figura 3.3 il·lustra per a un lot d'un mateix producte com la cerca d'informació per a totes les operacions veïnes del cas general es veu reduïda quan aquesta informació és la mateixa per totes les unitats. És per això que en aquest segon cas es parla indistintament tant de tasques com d'equips.

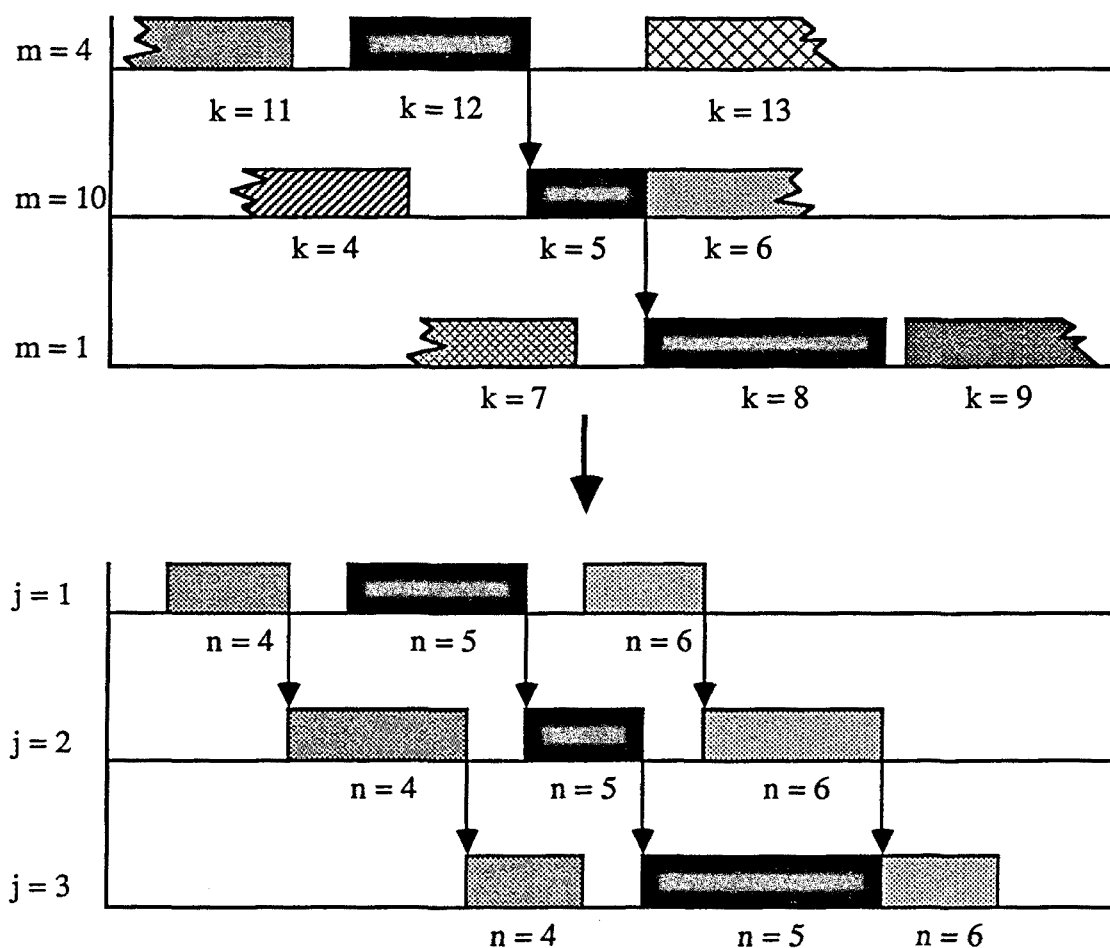


Fig. 3.3. Informació implícita en el model multiproducte.

Qualsevol seqüència de producció proposada, N, Y_{in}, B_n , està subjecta a les restriccions de seqüència:

- Cada lot n correspon a un sol producte i :

$$\sum_{i=1}^I Y_{in} = 1 \quad \forall n \leq N \quad ; \quad \sum_{i=1}^I Y_{in} = 0 \quad \forall n > N \quad (3.6)$$

- La càrrega processada per cada lot n està limitada per la capacitat dels equips:

$$0 \leq B_n \leq \sum_{i=1}^I Y_{in} \min_j \frac{V_j}{S_{ij}} \quad \forall n \quad (3.7)$$

- La producció total de cada producte i està acotada per la seva respectiva demanda:

$$Q_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} B_n \leq D_i \quad \forall i \quad (3.8)$$

El conjunt de temps corresponents a les diferents subtasques es pot determinar a partir de la seqüència i i de les dimensions dels lots processats segons les equacions 3.9 a 3.13. Els temps d'ompliment i buidament dels equips semicontinus han estat fixats a zero. Els temps d'operació de tots els equips semicontinus d'un mateix subtren han estat igualats al temps d'operació de l'equip limitant: aquest és l'equip que processa el lot més lentament i , per tant, el que individualment aporta el màxim temps d'operació. Els temps d'ompliment i buidament dels equips discontinus han estat ajustats als temps d'operació dels subtrens anterior i posterior respectivament.

$$t_{nj1} = \sum_{i=1}^I Y_{in} (a_{ijs} + b_{ijs} B_n^{c_{ijs}}) \left\{ \sum_{r=1}^I Y_{r,n-1} pp_{ri} + (1 - \sum_{r=1}^I Y_{r,n-1}) pp_{0i} \right\} \quad (3.9)$$

$$t_{jn2} = \sum_{i=1}^I Y_{in} (1 - z_{ij}) \max_{\varphi \in F_{ij+1}} \left\{ \frac{B_n D_{\varphi}}{R_{i\varphi}} \right\} \quad (3.10)$$

$$t_{jn3} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \left\{ z_{ij} \max_{\varphi \in F_{ij+1}} \left\{ \frac{B_n D_{\varphi}}{R_{i\varphi}} \right\} + (1 - z_{ij}) (a_{ijs} + b_{ijs} B_n^{c_{ijs}}) \right\} \quad (3.11)$$

$$t_{jn4} = \sum_{i=1}^I Y_{in} (1 - z_{ij}) \max_{\varphi \in F_{ij+1}} \left\{ \frac{B_n D_{\varphi}}{R_{i\varphi}} \right\} \quad (3.12)$$

$$t_{njs} = \sum_{i=1}^I Y_{in} (a_{ijs} + b_{ijs} B_n^{c_{ijs}}) \left\{ \sum_{r=1}^I Y_{r,n+1} pc_{ir} + \left(1 - \sum_{r=1}^I Y_{r,n+1}\right) pc_{i0} \right\} \quad (3.13)$$

La duració de les subtasques de preparació i neteja, amb les quals s'inicien i s'acaben cada un dels esdeveniments, estan relacionats amb els possibles canvis de producte que experimenta cada equip en funció dels esdeveniments que cal executar amb anterioritat i posterioritat. Els temps de preparació i neteja, doncs, es calculen mitjançant l'aplicació de factors de correcció dependents de la seqüència de productes que hom anomena penalitzacions de preparació i neteja.

Aquestes penalitzacions haurien de ser, estrictament, dependents del canvi de producte i de tasca i de l'equip que l'experimenta la qual cosa és fàcilment formulable com $pp_{i\phi ijn}$ i $pc_{ij\phi nm}$. En el cas multiproducte, i donada l'equivalència de tasques i equips, només seria necessari parlar del canvi de producte que experimenta cada tasca. Malgrat tot, això suposaria, al capdavant, el coneixement explícit de tots els possibles temps de preparació i neteja. La dificultat per disposar de tota aquesta informació provoca que les penalitzacions hagin estat considerades de forma general com pp_{ij} i pc_{ij} tenint en compte només el canvi de producte.

Un cop determinades les duracions de totes les subtasques, aquestes han de ser disposades en el diagrama de Gantt formant les diferents ordres de fabricació els temps d'inici i finalització de les quals han de respectar les restriccions de temps:

- Cada esdeveniment ha de començar després de l'acabament de l'anterior:

$$TI_{j,n+1} \geq TF_{jn} = TI_{jn} + \sum_{s=1}^{S=5} t_{njs} + TW_{jn} \quad \forall j,n \quad (3.14)$$

- Per un mateix lot n , cada tasca j determina l'inici de la següent $j+1$:

$$TI_{j+1,n} = TI_{jn} + \sum_{i=1}^I Y_{in} \left\{ (1-z_{ij}) \left\{ \sum_{s=1}^3 t_{njs} + TW_{jn} \right\} + z_{ij} t_{nj1} \right\} - t_{n,j+1,1}$$

$$j = 1, \dots, M-1 ; n = 1, \dots, N \quad (3.15)$$

L'expressió contempla els possibles lligams entre tasques discontinües i semicontínues (Fig. 3.4) i se simplifica en considerar el cas normal encara que particular en el qual els equips i les tasques associades són discontinües o semicontínues independentment del producte que es consideri ($z_{ij} \rightarrow z_j$).

$$TI_{j+1, n} = TI_{jn} + (1-z_j) \left\{ \sum_{s=1}^3 t_{njs} + TW_{jn} \right\} + z_j t_{nj1} - t_{nj+1,1} \quad (3.16)$$

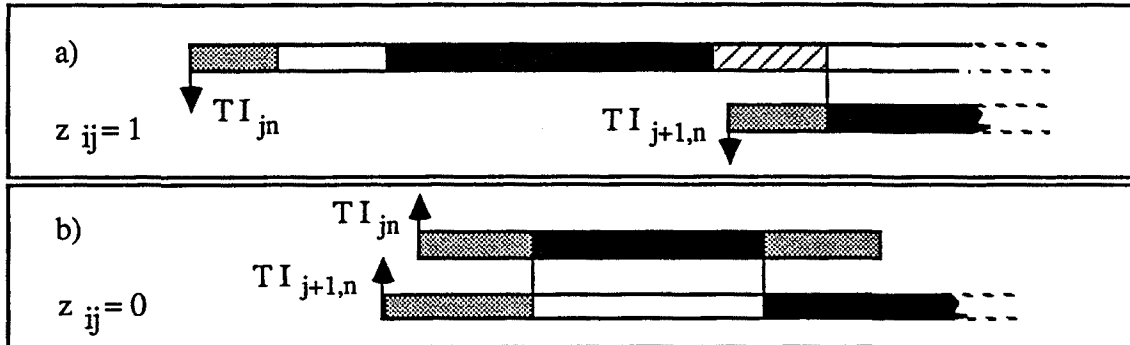


Fig. 3.4. Ligams de precedència entre tasques discontinües i semicontínues.

- Cada esdeveniment comença i acaba dins de l'horitzó de temps disponible:

$$0 \leq TI_{jn} \leq H \quad ; \quad 0 \leq TF_{jn} \leq H \quad (3.17)$$

- Els temps d'espera han de respectar les estabilitats dels productes intermedis segons la política FW (*Finite Wait*):

$$0 \leq TW_{jn} \leq \sum_{i=1}^I Y_{in} TW_{ij}^{\max} \quad \forall j, n \quad (3.18)$$

Finalment, els perfils de demanda de serveis generals, determinats per les necessitats específiques de cada recepta i el conjunt de temps assignats als esdeveniments TI_{jn} , han de satisfer les restriccions de serveis generals que imposen els límits de la potència disponible:

$$W_u(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^{S=5} \sum_{v=1}^{V_{jnu}} W_{jnsuv}(t) \leq W_u^{\max} \quad ; \quad -\infty < t < \infty \quad \forall u \quad (3.19)$$

Els perfils de consum de cada servei han estat definits a partir de les següents expressions:

$$W_{jnsuv}(t) = w_{jnsuv} \Gamma_{jnsuv} P_{jnsuv} \left\{ \theta(t - TI_{jnsuv}^w) - \theta(t - TF_{jnsuv}^w) \right\} \quad (3.20)$$

$$w_{jnsuv} = \sum_{i=1}^I Y_{in} (a_{ijsuv}^w + b_{ijsuv}^w \cdot B_n^w c_{ijsuv}^w) \quad (3.21)$$

$$\Gamma_{jnsuv} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \left(\gamma_{ijsuv} + \frac{(1 - \gamma_{ijsuv})}{(TF_{jnsuv}^w - TI_{jnsuv}^w)} \right) \quad (3.22)$$

$$P_{jnsuv} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \sum_{g=1}^I Y_{i,n-1} \sum_{h=1}^I Y_{i,n+1} PW_{ghijsuv} \quad (3.23)$$

$$TI_{jnsuv}^w = TI_{jn} + \sum_{\sigma=1}^{s-1} t_{nj\sigma} + TW_{jn} \cdot \theta(s-4) + t_{njs} \sum_{i=1}^I Y_{in} \delta t_{ijsuv}^o \quad (3.24)$$

$$TF_{jnsuv}^w = TI_{jn} + \sum_{\sigma=1}^{s-1} t_{nj\sigma} + TW_{jn} \cdot \theta(s-4) + t_{njs} \sum_{i=1}^I Y_{in} \delta t_{ijsuv} \quad (3.25)$$

L'expressió (3.21) determina la magnitud del consum com a funció de la dimensió del lot. En el cas que aquest sigui constant l'expressió deriva en:

$$w_{jnsuv} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \left(a_{ijsuv}^w + b_{ijsuv}^w \cdot B_n^c c_{ijsuv}^w \right) = \sum_{i=1}^I Y_{in} \cdot \omega_{ijsuv} \quad (3.26)$$

La magnitud del consum pot venir expressada en unitats o unitats/temps (equivalents a potència o energia) que són casos distingibles mitjançant un paràmetre binari γ_{njksu} . Com que la magnitud acotada és l'equivalent a potència cal convertir les unitats d'aquells consums expressats en equivalents d'energia. L'expressió (3.22) s'encarrega d'aquesta transformació tenint en compte la duració variable del temps del consum.

L'expressió (3.22) indica que la magnitud del consum també es pot veure afectada per la seqüència en forma de penalitzacions per canvi de producte. L'expressió formulada per al cas més general és exagerada ja que, en principi, només caldria aplicar-la a preparacions i neteges. La informació que requereix és així mateix, difícilment tractable.

La interrelació i la dependència dels diferents components del model apareixen a la figura 3.5 en la qual també hi són inclosos els termes de la funció objectiu que es comenten a continuació.

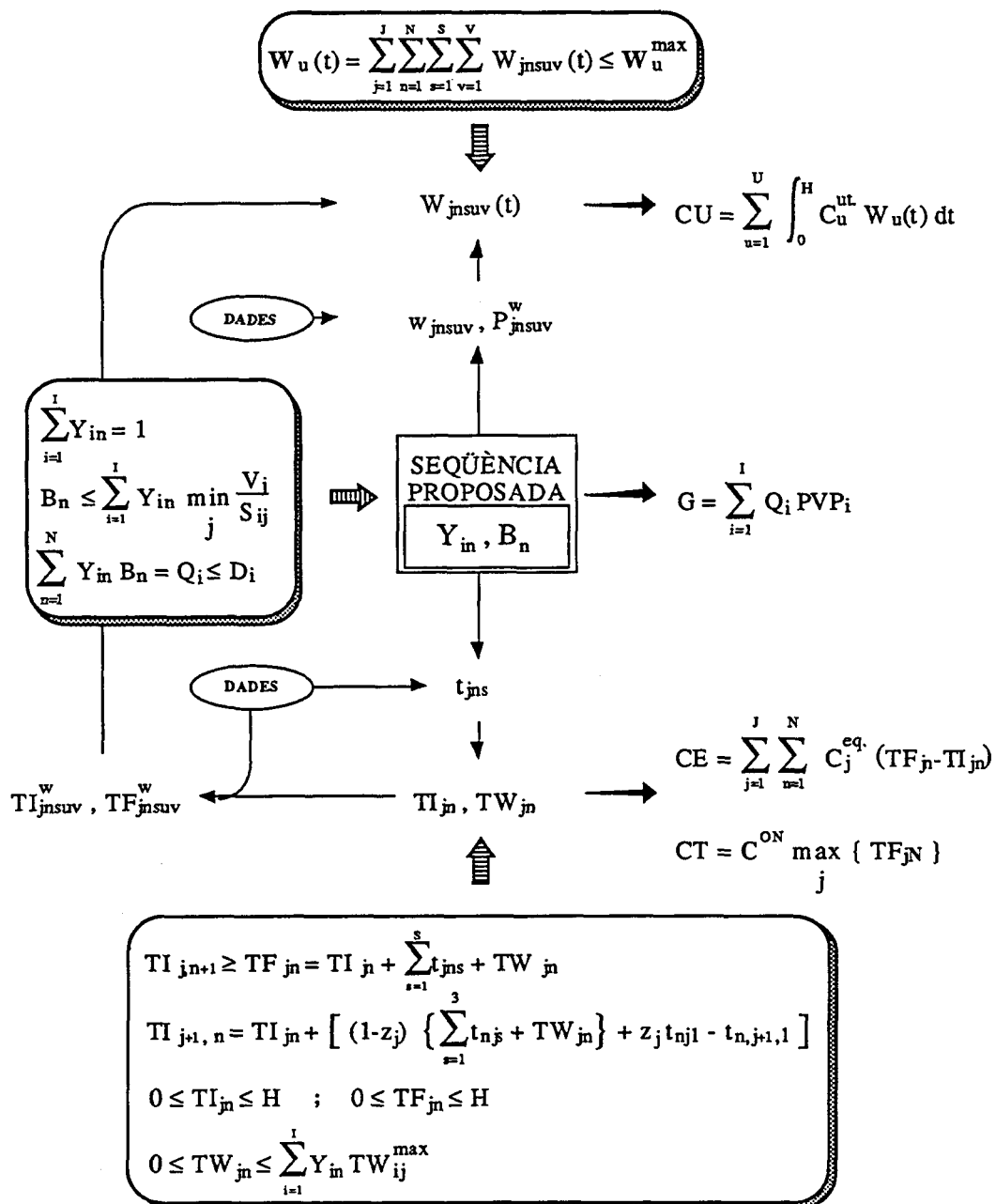


Fig. 3.5. Esquema del model multiproducte.

Funció objectiu per al model multiproducte

Els costos de producció CE relacionats amb l'ús dels equips (amortització, manteniment...) es calculen emprant costos individuals per temps d'utilització. Aquests costos poden distingir-se en funció de la subtasca que es realitzi o del producte que es processa. Tanmateix, en la major part dels casos serà perfectament acceptable un cost C_j^{eq} per temps i per equip utilitzat.

$$CE = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S Y_{in} (C_{ijs}^{eq} t_{jns} + C_{ij}^{TW} TW_{jn}) \quad (3.27)$$

$$CE = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N C_j^{eq} (TF_{jn} - TI_{jn}) \quad (3.28)$$

El cost associat a la utilització dels serveis generals es calcula en termes de la demanda total de cada servei tenint en compte el seu cost específic $C_u^{ut.}$:

$$CU = \sum_{u=1}^U \int_0^H C_u^{ut.}(t) W_u(t) dt \quad (3.29)$$

L'expressió es pot simplificar amb facilitat si no es contempen variacions dels coeficients de cost (inexistència de tarifes nocturnes, etc...):

$$CU = \sum_{u=1}^U C_u^{ut.} \int_0^H W_u(t) dt \quad (3.30)$$

El cost associat al temps invertit ve donat per:

$$CT = C^{ON} \max_j \{ TF_{jN} \} + C^{OFF} H \quad (3.31)$$

on s'apliquen un coeficient de cost C^{ON} per al temps durant el qual la planta es troba en funcionament (*makespan*) i un altre de menor C^{OFF} per al temps total disponible. C^{OFF} està relacionat amb els costos fixos (amortització, mà d'obra...) per la qual cosa és, doncs, constant i no és necessari considerar-lo en el procés d'optimització:

$$CT = C^{ON} \max_j \{ TF_{jN} \} + \cancel{C^{OFF} H}^{ct.} \quad (3.32)$$

Els beneficis de producció depenen de les quantitats totals produïdes de cada producte i dels corresponents preus de venda (PVP_i) els quals poden dependre o incloure també d'altres costos per unitat de producció (matèries primeres, etc...):

$$G = \sum_{i=1}^I Q_i PVP_i \quad (3.33)$$

La funció objectiu global a maximitzar és, doncs:

$$F = G - CE - CU - CT \quad (3.34)$$

Solucions per a la seqüenciació multiproducte. Dimensions dels lots.

Com primera aproximació, les dimensions dels lots de cada un dels productes es poden considerar fixes. D'aquesta manera les quantitats produïdes vénen ràpidament determinades per:

$$Q_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} B_n = B_i N_i \leq D_i \quad \forall i \quad (3.35)$$

En aquest cas es pot establir prèviament B_i i N_i sota la hipòtesi força raonable que és desitjable el menor número de lots de la major grandària possible:

$$N_i = 1 + \text{INT} \left(\frac{D_i}{B_i^{\max}} \right) \quad \text{i després} \quad B_i = \frac{D_i}{N_i} \quad \forall i \quad (3.36)$$

o bé es possible emprar directament B_i^{\max} en lloc de B_i si la restricció de demanda pot ésser reformulada com:

$$Q_i < D_i + B_i^{\max} \quad \forall i \quad (3.37)$$

Cost de l'ús dels serveis generals.

En la majoria dels casos multiproducte una única ruta de producció possible i predeterminada no permetrà variacions en les necessitats de consums de serveis generals. En aquests casos no hi haurà necessitat d'optimitzar el terme CU que romandrà constant. Un cost energètic addicional per unitat de producció pot ser considerat per tal de computar la despesa resultant de la utilització dels serveis.

Tanmateix, i fins i tot en casos multiproducte, existeixen situacions en les quals els requeriments de serveis generals són necessàriament depenents de la seqüència de productes:

- Quan intervenen necessitats de serveis penalitzades pels canvis de producte: per exemple, en el cas del tractament dels residus derivats de les tasques de neteja.

- Quan és possible l'estalvi d'energia mitjançant el bescanvi de calor entre diferents lots.

Ambdós casos han estat tractats específicament en estudis paral·lels (Grau et al. 1993, 1995) que s'han portat a terme en el mateix grup de treball amb la finalitat de desenvolupar metodologies de minimització de residus i integració energètica compatibles amb el model proposat.

Cost de l'ús dels equips.

CE també pot ser considerat independent de la seqüència i, per tant, constant i menyspreable en l'optimització de bona part dels casos. Tenint en compte que el camí de producció està fixat per tots els lots, les úniques variacions possibles en $\Sigma(TF_{jn} - TI_{jn})$ vindrien donades per:

- Cobriment de la demanda, tot respectant l'horitzó de temps, amb un número de lots superior a l'estrictament necessari (és dir amb lots de dimensió insuficient).
- Temps de preparació i neteja penalitzats per canvi de producte.
- Temps d'espera.

Supòsits, tots aquests, que ja s'eviten al fixar les dimensions dels lots als màxims possibles i al cercar la minimització del temps total i defugir, per tant, els canvis desfavorables de producte (que normalment implicaran al mateix temps majors consums i temps d'espera).

Cost del temps.

El cost del temps expressat com (3.31) fa ús explícit del criteri de minimització del temps de finalització de tots els treballs (*makespan*) en lloc d'altres criteris d'optimització ben coneguts (*mean flowtime*, *tardiness*, etc...):

$$T = \max_j \{ TF_{jN} \} \quad (3.38)$$

$$\min T \leq H \quad (3.39)$$

La minimització del *makespan* T comporta la minimització de CT , però també la de CE i CU en molts casos, amb la qual cosa hom pot substituir la funció objectiu per:

$$F = G - CE - CU - CT \quad (3.40)$$

Tenint en compte, tal i com és usual, que produir algun producte continua essent més rentable que mantenir la planta inactiva, la funció objectiu es pot desacoblar en dos termes:

max G problema de la motxilla: establert un conjunt de demandes $\{D_i\}_i$ cal determinar el número de lots de cada producte $\{N_i\}_i$ que maximitzen els beneficis G i poden ser produïts dins de l'horitzó de temps disponible H (suposant constants les dimensions dels lots de cada producte).

min T problema de seqüenciació: establert un conjunt de lots de diferents productes $\{N_i\}_i$ cal determinar la seqüència $\{Y_{in}\}_{in}$ que minimitzi el temps de finalització (*makespan*) T després de satisfer les restriccions de temps i de consum de serveis generals. En el cas multiproducte, el problema esdevé del tipus TSP (*Travelling Salesman Problem*, capítol 2) ja que els temps de cicle i els temps de canvi poden ser perfectament determinats.

El temps de finalització mínim revela si una determinada seqüència de lots pot respectar l'horitzó de temps o no. Si és així, el *makespan* mínim no tant sols suposa la minimització de CT sinó que possibilita la maximització de G al implicar un augment del temps disponible per produir més lots en cas d'haver-hi més demanda. D'aquesta manera, diferents estratègies de solució iteratives poden ser plantejades sobre aquest esquema inicial.

Temps de cicle.

En el cas multiproducte, els temps de cicle per un producte i els temps de canvi per cada parell de productes, és dir, la diferència entre els temps de finalització de dos lots consecutius, poden ser definits i són constants: tots els lots segueixen la mateixa ruta de producció amb els mateixos temps d'operació.

La inclusió de temps d'espera addicionals entre operacions amb la finalitat de fer respectar les restriccions de serveis general pot desembocar en situacions aperiòdiques que impossibilitin l'existència de temps de cicle constants. En aquests casos és possible la resolució de la seqüenciació de lots estimant temps de cicle mitjos (Graells et al., 1992).

Casos intermedis

Un salt en la seqüència de tasques d'un lot respecte d'un altre és possible quan es permeten receptes amb menys tasques que equips disponibles o, el que resulta el mateix, quan es permeten tasques amb temps nuls. Llavors el cas multiproducte estricte esdevé relaxat.

Salts d'aquest tipus, tal i com s'il·lustra en la figura 3.6, comporten la possibilitat de que un lot n interaccionï no només amb el lot previ $n-1$ i amb el lot posterior $n+1$, sinó, en principi, amb qualsevol altre. Conseqüentment també, els avançaments de lots en el temps són possibles. I en el límit límit d'aquesta situació es trobaria el cas dels productes independents quan a equips però que comparteixen uns mateixos serveis generals limitats.

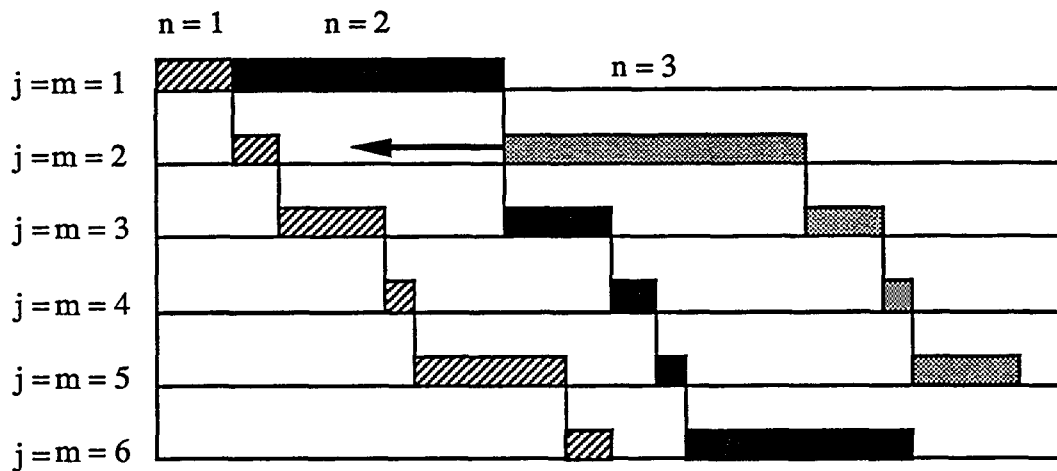


Fig. 3.6. Tasques amb temps nuls.

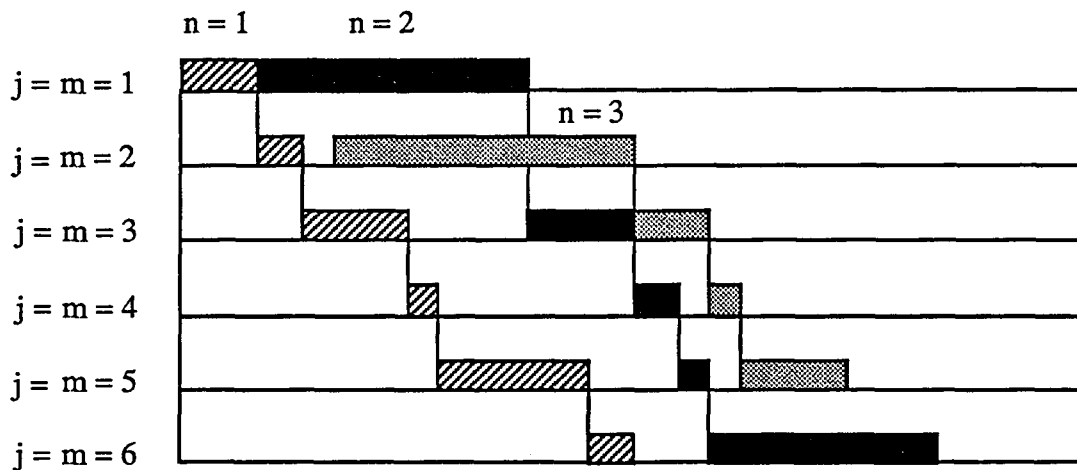


Fig. 3.7. Minimització del *makespan*.

La formulació del problema continua essent la mateixa llevat de l'equació (3.14) que imposa que no puguin cavalcar esdeveniments en un mateix equip. En aquest cas resulta:

$$TI_{j,n+1} \geq \max_{v < n} \{ TF_{jv} - \theta(TF_{jv} - TI_{jv}) \} \quad (3.41)$$

que permet l'aprofitament per part de qualsevol lot de l'equip vacant que pugui deixar el lot anterior tal i com il·lustra l'exemple de la figura 3.7.

Igualment, cal tenir en compte un possible avançament de lots a l'avaluació del *makespan*:

$$T = \max_{j, n} \{ TF_{jn} \} \quad ; \quad T \leq H \quad (3.42)$$

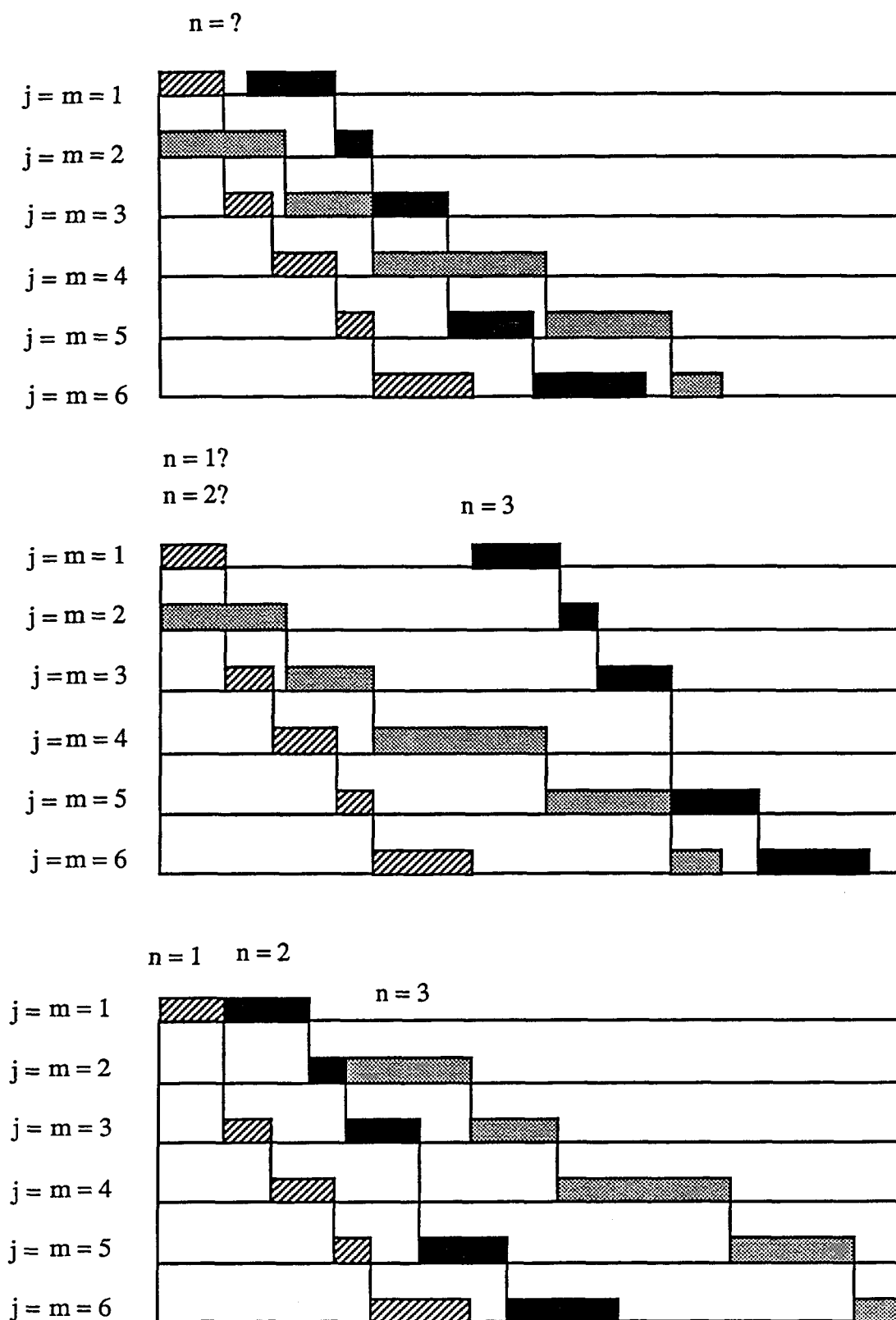


Fig. 3.8. Indeterminació de la seqüència de productes.

L'ampliació del model, però, presenta alguns inconvenients. El cas de les figures 3.6 i 3.7 es descriu correctament amb el model proposat fins aquí sempre i quan no es considerin temps de preparació i neteja. Aquests temps depenen de la seqüència de lots per mitjà de les penalitzacions per canvi de producte. Però els casos de les figures 3.6 i 3.7 no permeten determinar inequívocament la seqüència de lots. En aquest cas les penalitzacions per canvi de producte haurien de ser aplicades a cada equip en concret per la qual cosa seria necessari conèixer la història de les operacions realitzades per cada un dels equips.

La figura 3.8 proposa un altre exemple de la insuficiència del model multiproducte. Mentre la formulació de temps nuls obliga a una seqüència de lots única i perfectament definida en les figures 3.6 i 3.7 la programació òptima de les operacions, i que resulta evident, requereix que cada equip experimenti una seqüència de productes diferent. Els temps de finalització obtinguts són prou significatius.

Tot i així, el model pot resultar extremadament útil, degut a la seva simplicitat, en casos particulars en els quals no siguin determinants les operacions de preparació i neteja o en els quals no siguin possibles els creuaments de la figura 3.8. De la mateixa manera, també és possible el tractament de l'operació en fase de més d'un equip si la seva descripció no precisa un gran detall: es pot interpretar com un sol equip de capacitat i necessitats equivalents als totals. Altrament es requereix un model molt més acurat que permeti superar les insuficiències exposades.

3.1.2. Model multipropòsit

El model multipropòsit general sorgeix del relaxament de les restriccions imposades sobre la recepta, x_{ijm} , en el model multiproducte. Qualsevol equip ha de poder ser considerat com un equip alternatiu possible per a l'execució de qualsevol tasca de qualsevol producte. D'aquesta manera també és permesa l'assignació d'un grup d'equips a la realització d'una mateixa tasca i l'assignació d'un mateix equip a la realització de diverses tasques d'un mateix lot, és a dir, l'operació en fase i la reutilització dels equips. El problema, en aquest cas, cal que es formuli tenint en compte que:

- La seqüència de lots de productes que experimenta la planta (Y_{in}) deixa de tenir significat i no és suficient per descriure'n l'operació.
- És la història, és dir la seqüència, detallada de les operacions realitzades en cada equip el que permetrà una descripció completa de l'operació de la planta.

La variable Y_{in} se substitueix per una de nova:

$$X_{ijkmn} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k,m,n \quad (3.43)$$

on:

$$X_{ijkmn} = \begin{cases} 1 & \text{si la tasca } j \text{ del producte } i \text{ en el lot } n \\ & \text{s' assigna al } k - \text{èssim ús de la unitat } m \\ 0 & \text{altrament} \end{cases} \quad (3.44)$$

També resulta necessària una altra variable per especificar les quantitats processades a cada equip. Ha estat escollit el factor d'utilització de l'equip m la k -èssima vegada que se'n fa servei. Aquest factor es defineix com el quocient entre la capacitat utilitzada i la capacitat nominal de l'equip. Igualment, es pot definir en funció de la quantitat processada \bar{B}_{km} o el volum utilitzat \bar{V}_{km} :

$$\eta_{km} = \frac{\text{Quantitat processada } (\bar{B}_{km})}{\text{Capacitat } (V_m / S_{ijm})} = \frac{\text{Volum ocupat } (\bar{V}_{km})}{\text{Volum disponible } (V_m)} \quad (3.45)$$

Aquestes variables defineixen completament la seqüència d'operacions que cal dur a terme en cada equip i cal que observin les restriccions de seqüenciació:

- La selecció i assignació d'equips m a les tasques ij ha d'estar permesa per la recepta:

$$X_{ijkmn} \leq x_{ijm} \quad \forall i,j,k,m,n \quad (3.46)$$

- L'ús de l'equip m per k -èssima vegada només pot ser assignat a una sola tasca j d'un únic producte i :

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} = 1 \quad \forall m, k \leq K_m \quad (3.47)$$

- Els equips només poden ser utilitzats entre el 0% i el 100% de llur capacitat nominal:

$$0 \leq \eta_{km} \leq 1 \quad \forall k, m \quad (3.48)$$

- Els diferents esdeveniments km que participen en una mateixa tasca j d'un mateix lot n defineixen la dimensió del lot com el total de les quantitats processades en cada un dels corresponents equips. La dimensió del lot ha de ser la mateixa per totes les tasques d'aquest lot:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} X_{ijkmn} \eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}} = B_{in} \quad \forall n, i, j \leq J_i \quad (3.49)$$

- La producció total de cada producte ha de romandre acotada per la seva demanda:

$$Q_i = \sum_{n=1}^N B_{in} \leq D_i \quad \forall i \quad (3.50)$$

A partir de les variables de seqüenciació (equips emprats, quantitats processades, etc...), els diferents temps d'operació es determinen per mitjà d'expressions del tipus:

$$t_{km} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} (a_{ijm} + b_{ijm} (\eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}})^{c_{ijm}}) \quad (3.51)$$

les qual deriven en les equacions 3.52 a 3.60 en el cas general que contempla temps de preparació i neteja (depenents de la seqüència) i d'etapes de transferència (ompliment i buidament) mitjançant equips semicontinus.

$$t_{kms} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} \tau_{ijkms} P_{ijkmn}^p \quad (3.52)$$

$$t_{kms} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} (1-z_{ij}) \tau_{i,j-1,n}^{sc.} \quad (3.53)$$

$$t_{kms} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} \left\{ z_{ij} \tau_{ijn}^{sc.} + (1-z_{ij}) \tau_{ijkms} \right\} \quad (3.54)$$

$$t_{kms} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} (1-z_{ij}) \tau_{i,j+1,n}^{sc.} \quad (3.55)$$

$$t_{kms} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} \tau_{ijkms} P_{ijkmn}^c \quad (3.56)$$

$$\tau_{ijn}^{sc.} = \max_{\phi \in F_{ij}} \left\{ \sum_{\mu=1}^M \sum_{\kappa=1}^{K_m} X_{i\phi\kappa\mu n} \frac{\eta_{\kappa\mu} R_{\mu}}{B_n D_{i\phi\mu}} \right\}^{-1} \quad (3.57)$$

$$\tau_{ijkms} = a_{ijms} + b_{ijms} \left(\eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}} \right)^{c_{ijms}} \quad (3.58)$$

$$P_{ijkmn}^p = \sum_{v=1}^N \sum_{l=1}^I \sum_{\varphi=1}^{J_i} X_{l\varphi,k-1,mv} p_{p_{m\varphi ij}} + \left(1 - \sum_{v=1}^N \sum_{l=1}^I \sum_{\varphi=1}^{J_i} X_{l\varphi,k-1,mv} \right) p_{p_{m00ij}} \quad (3.59)$$

$$P_{ijkmn}^c = \sum_{v=1}^N \sum_{l=1}^I \sum_{\varphi=1}^{J_i} X_{l\varphi,k+1,mv} p_{c_{mij\varphi}} + \left(1 - \sum_{v=1}^N \sum_{l=1}^I \sum_{\varphi=1}^{J_i} X_{l\varphi,k+1,mv} \right) p_{c_{mij00}} \quad (3.60)$$

Una vegada computats la duració de totes les operacions aquestes han de ser acoblades de manera que els diferents esdeveniments compleixin les restriccions de temps:

- L'inici de cada esdeveniment està acotat pel final del darrer esdeveniment realitzat en el mateix equip:

$$TI_{k+1,m} \geq TF_{km} = TI_{km} + \sum_{s=1}^S t_{kms} + TW_{km} \quad \forall k, m \quad (3.61)$$

- L'inici de la càrrega de tots els equips que intervenen en una etapa ijn ha de ser simultani a l'inici de la descàrrega de l'etapa anterior $i,j-1,n$:

$$\begin{aligned} & (X_{i,j+1,kmn} X_{ij\kappa\mu n}) (TI_{km} + t_{km1}) = \\ & (X_{i,j+1,kmn} X_{ij\kappa\mu n}) (TF_{\kappa\mu} + t_{\kappa\mu 1} + z_{ij} (t_{\kappa\mu 2} + t_{\kappa\mu 3} + TW_{\kappa\mu})) \\ & \forall i, j, n, k, m, \kappa, \mu \end{aligned} \quad (3.62)$$

- La càrrega i la descàrrega de tots els equips utilitzats en una mateixa etapa ijn (utilització en fase) ha de ser simultània:

$$(X_{ijkmn} X_{ij\kappa\mu n}) (TI_{km} + t_{km1}) = (TI_{\kappa\mu} + t_{\kappa\mu 1}) (X_{ijkmn} X_{ij\kappa\mu n}) \quad (3.63)$$

$$(X_{ijkmn} X_{ij\kappa\mu n}) (TF_{km} - t_{kmS}) = (TF_{\kappa\mu} - t_{\kappa\mu S}) (X_{ijkmn} X_{ij\kappa\mu n}) \quad (3.64)$$

$$\forall k, m, \kappa, \mu$$

- Els temps d'espera han de satisfer la política d'espera finita (FW) marcada per les estabilitats dels productes intermedis:

$$0 \leq TW_{km} \leq \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} X_{ijkmn} TW_{ijm}^{\max} \quad \forall k, m \quad (3.65)$$

- Els temps inicials i finals de tots els esdeveniments han d'estar continguts dins de l'horitzó de temps:

$$0 \leq TI_{km} \leq H ; \quad 0 \leq TF_{km} \leq H \quad \forall k, m \quad (3.66)$$

Finalment, els perfils de demanda dels diferents serveis generals derivats de la temporització de les operacions i les necessitats de les receptes han de ser consistents amb la disponibilitat d'aquests serveis i satisfer les **restriccions de serveis generals**:

$$W_u(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^{S=5} \sum_{v=1}^{V_{ijsu}} W_{kmsuv}(t) \leq W_u^{\max} \quad \forall u \quad (3.67)$$

Els perfils de demanda de serveis generals s'obtenen com la suma de totes les contribucions individuals que es determinen segons les expressions següents. Aquestes expressions contemplen la dependència de les demandes particulars de serveis amb els requeriments específics de la recepta, la duració d'aquesta demanda segons la temporització de les operacions i l'efecte dels canvis de producció en les subtasques de preparació i neteja:

$$W_{kmsuv}(t) = w_{kmsuv} \Gamma_{kmsuv} P_{kmsuv} \left\{ \theta(t - TI_{kmsuv}^w) - \theta(t - TF_{kmsuv}^w) \right\} \quad (3.68)$$

$$P_{kmsuv} = \begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^I \sum_{\varphi=1}^J \sum_{v=1}^N X_{ijkmn} X_{t\varphi, k-1, mv} PW_{t\varphi ijmsu}^p & s = 1 \\ 1 & s = 2, 3, 4 \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^I \sum_{\varphi=1}^J \sum_{v=1}^N X_{ijkmn} X_{t\varphi, k+1, mv} PW_{t\varphi ijmsu}^c & s = 5 \end{cases} \quad (3.69)$$

$$w_{kmsuv} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} \left(a_{ijmsuv}^w + b_{ijmsuv}^w \left(\frac{\eta_{km} V_m}{S_{ijm}} \right)^{c_{ijmsuv}^w} \right) \quad (3.70)$$

$$\Gamma_{kmsuv} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} \left(\gamma_{ijmsuv} + \frac{(1 - \gamma_{ijmsuv})}{(TF_{kmsuv}^w - TI_{kmsuv}^w)} \right) \quad (3.71)$$

$$TI_{kmsuv}^w = TI_{km} + \sum_{\sigma=1}^{s-1} t_{k\mu\sigma} + TW_{km} \cdot \theta(s-4) + t_{kms} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} \delta t_{ijmsuv}^0 \quad (3.72)$$

$$TF_{kmsuv}^w = TI_{km} + \sum_{\sigma=1}^{s-1} t_{k\mu\sigma} + TW_{km} \cdot \theta(s-4) + t_{kms} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} \delta t_{ijmsuv} \quad (3.73)$$

L'esquema de la figura 3.6 mostra les relacions entre els diferents aspectes del model multipropòsit proposat i la seva incidència sobre els diversos termes de la funció objectiu que també hi són detallats.

Funció objectiu multipropòsit

Els elements que constitueixen la funció objectiu són fonamentalment equivalents als emprats en el model multiproducte. És necessari tenir en compte algunes particularitats per tal d'avaluar correctament els diferents termes, bàsicament referides al canvi dels índexs identificadors de cada un dels esdeveniments (jn per km):

$$F = G - CE - CU - CT \quad (3.74)$$

El cost d'utilització d'equips implica la substitució de les equacions (3.27) i (3.28) per:

$$CE = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S X_{ijkmn} (C_{ijs}^{eq} t_{kms} + C_{ij}^{TW} TW_{km}) \quad (3.75)$$

$$CE = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M C_m^{eq} (TF_{km} - TI_{km}) \quad (3.76)$$

Les equacions (3.29) i (3.30) es mantenen vigents per al càlcul del cost de l'utilització dels serveis generals. Quant a l'avaluació del cost del temps, les equacions (3.31) i (3.32) continuen essent vàlides per bé que el temps invertit cal computar-lo extenent la cerca de l'equació (3.38) a tots els esdeveniments:

$$T = \max_{k,m} \{ TF_{km} \} \quad (3.77)$$

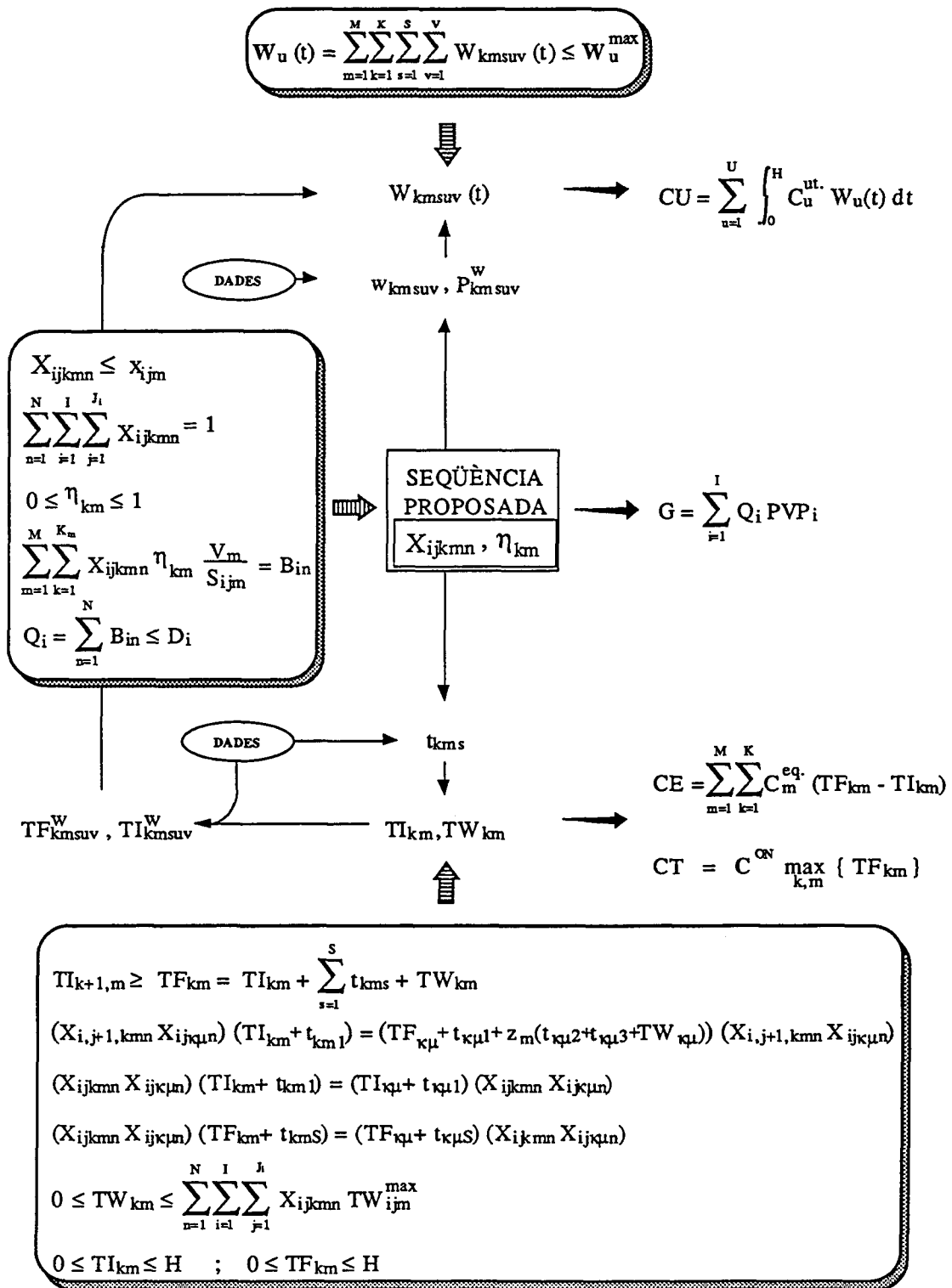


Fig. 3.9. Esquema del model multipropòsit.

Els beneficis continuen essent funció de les quantitats finalment produïdes de cada producte i els seus respectius preus de venda:

$$G = \sum_{i=1}^I Q_i PVP_i \quad (3.78)$$

$$Q_i = \sum_{n=1}^N B_{in} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} X_{ijkmn} \left(\eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}} \right) \quad \forall i, j \leq J_i \quad (3.79)$$

Nogenysmenys, les quantitats produïdes han de ser avaluades, en el cas multipropòsit, pensant en les diferents dimensions de lot que es poden donar per a un mateix producte.

Solucions al problema multipropòsit

Un primer pas simplificador consisteix en fixar dimensions de lot constants com en el cas multiproducte, la qual cosa resulta industrialment acceptable si es persegueix el manteniment d'una regularitat de producció. Per bé que en aquell cas la imposició dels valors màxims possibles a les dimensions de lot era una acció clara, en el cas multipropòsit pressuposa el coneixement previ dels equips assenyalats per executar les tasques de cada un dels lots.

L'establiment de dimensions de lot fixes per cada producte implica la presa d'unes decisions que comprometan totes les decisions ulteriors i al mateix temps treu flexibilitat a la capacitat de producció de la planta. Una solució de compromís consisteix en la determinació d'un conjunt acceptable de rutes de producció possibles per a cada producte i el seu corresponent conjunt de dimensions de lot associat.

En qualsevol cas, l'acceptació de diferents rutes i diferents dimensions de lot possibles per a un mateix producte deriva en la inexistència de temps de cicle per cada producte i de temps de canvi per parells de productes, amb la qual cosa el problema deixa de potser formular-se com un TSP.

També, a l'igual del cas multiproducte, es pot intentar l'aproximació:

$$F = G - \cancel{CE} - \cancel{CU} - CT \quad (3.80)$$

que permet concentrar l'atenció del problema en resoldre max G i min T. Aquesta possibilitat es presenta:

- Si és acceptable considerar $CE \approx ct.$ i $CU \approx ct.$ com en el cas multiproducte. En el cas multipropòsit això no és obvi donada la possibilitat de tria d'equips diferents (quan a consums, costos de manteniment...) per dur a terme una mateixa tasca que provoca que tant CE com CU puguin dependre significativament del programa d'operacions proposat.

- Si és acceptable suposar, en qualsevol cas, que $CT \gg CE+CU$. La minimització del *makespan* motiva, normalment i conjunta, la minimització dels costos d'utilització d'equips i serveis ($\min T \Rightarrow \min \{CE + CU\}$). En el cas multipropòsit cal contemplar la possibilitat que el *makespan* mínim s'obtingui a costa de la tria dels equips més cars i amb consums més elevats, la qual cosa podria implicar una programació globalment cara.

Evidentment, a l'igual del cas multiproducte, no és possible menystenir els efectes dels costos energètics quan els treballs de preparació i neteja, els quals depenen de la seqüència de productes, revesteixen importància o quan existeixen oportunitats de bescanvi energètic entre diferents lots. Aquests casos han de ser tractats plegats amb les metodologies existents de minimització de residus i integració energètica.

3.2. Planificació de la producció

El problema de la planificació de la producció sorgeix a l'intentar ajustar la producció de la planta a una demanda donada. En un model multiperíode, l'horitzó de temps disponible a llarg termini ha estat discretitzat per tal de tenir en compte perfils de demanda variables. Han estat considerats $p = 1, \dots, P$ períodes a intervals d_p tals que:

$$d_0 < \dots < d_{p-1} < d_p < \dots < H \quad (3.81)$$

als qual se'ls hi associa un conjunt de demandes o previsions de demandes $\{D_{ip}\}_{ip}$.

També es consideren $q = 1, \dots, NQ$ parades de planta (caps de setmana, manteniment, etc...) a temps h_q tals que:

$$h_0 < \dots < h_{q-1} < h_q < \dots < H \quad (3.82)$$

La programació òptima de les operacions als diferents períodes q defineix el problema de la planificació de la producció. L'objectiu és la determinació de:

Y_{inq}, B_{nq} i TI_{jnq} en el cas multiproducte.

X_{ijkmnq}, h_{kmq} i TI_{kmq} en el cas multipropòsit.

Per a cada període q cal resoldre el problema de programació de les operacions. La formulació corresponent s'obté simplement afegint el subíndex q a les diferents equacions i

variables del model introduïdes fins aquí. Les restriccions de temps s'han de reescriure ara com:

$$h_{q-1} \leq TI_{kmq} \leq h_q \quad \forall k,m \quad (3.83)$$

$$h_{q-1} \leq TF_{kmq} \leq h_q \quad \forall k,m \quad (3.84)$$

El problema de la planificació de la producció resulta, finalment, de la integració dels subproblemes de programació d'operacions dels diferents períodes per mitjà de les restriccions globals de demanda que cal satisfer:

$$\sum_{i=1}^I (QT_{ip} - DT_{ip}) \leq 0 \quad (3.85)$$

DT_{ip} i QT_{ip} són, respectivament, les demandes i produccions totals acumulades a l'últim període P . La demanda acumulada de producte i que cal haver satisfet al final d'un període p ve donada per:

$$DT_{ip} = \sum_{r=1}^p D_{ir} \quad \forall i,p \quad (3.86)$$

El càlcul de la producció acumulada per producte i període depèn dels models emprats per descriure tant l'operació de la planta com la distribució de períodes a l'horitzó de temps. L'exemple més senzill es troba en el cas multiproducte amb dimensions de lot fixes quan se suposen períodes p constituïts per un cert nombre de períodes q de la mateixa durada. Llavors:

$$QT_{ip} = \sum_{q=1}^{PQ_p} \sum_{n=1}^{N_{ipq}} Y_{inq} B_n \quad \forall i,p \quad (3.87)$$

La complexitat d'aquest càlcul s'incrementa notablement fins arribar al cas del model multipropòsit general que contempla períodes p i q independents i no relacionats:

$$QT_{ip} = \sum_{\pi=1}^p \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} X_{ijkmn} \left(\eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}} \right) \theta(d_{\pi} - TF_{km}) \quad \forall i, j \leq J_i \quad (3.88)$$

Funció objectiu

La funció objectiu de la planificació de la producció conté, evidentment, els termes de cost ja definits. A més, ha de tenir en compte els costos derivats de la distribució de la producció i la demanda al llarg del temps. Aquests són els costos lligats a l'estoc (CS) i als retards (CR):

$$F = G - CE - CU - CT - CS - CR \quad (3.89)$$

El valor de l'emmagatzemament S i el retard D per producte i període es calcula segons:

$$S_{ip} = - D_{ip} = QT_{ip} - DT_{ip} \quad (3.90)$$

mentre que l'avaluació del cost associat pot fer-se efectiu mitjançant expressions i paràmetres generals (C_i^r , C_i^s , α_i , β_i ...) com, per exemple:

$$CS = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \left\{ C_i^s S_{ip} \theta(S_{ip}) + \sum_{r=p+1}^P r^{\alpha_i} C_i^s (QT_{ip} - DT_{ir}) \theta(QT_{ip} - DT_{ir}) \right\} \quad (3.91)$$

$$CR = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \left\{ C_i^r R_{ip} \theta(R_{ip}) + \sum_{r=p+1}^P r^{\beta_i} C_i^r (DT_{ir} - QT_{ip}) \theta(DT_{ir} - QT_{ip}) \right\} \quad (3.92)$$

Tanmateix, l'avaluació d'aquests costos vindrà normalment condicionada per criteris molt particulars. Les expressions corresponents hauran de proposar-se en cada cas concret un cop examinades la política d'empresa, les prioritats dels clients, etc.

La consideració de tots aquests factors genera un problema d'excepcional complexitat. Per al seu tractament ha de ser reformular fent incidència solament en els seus trets generals, per a la qual cosa manca assumir que:

- La variació dels costos d'utilització dels equips i serveis generals no influeix en gran mesura els valors finals de la funció objectiu.
- Tots els productes tenen preus similars i també costos semblant d'emmagatzemament i retard.
- La producció de qualsevol producte sempre resulta més rentable que la inactivitat de la planta.

En aquest cas, els objectius del problema esdevindran la maximització de la producció en lloc dels beneficis:

$$\max G = \sum_{i=1}^I QT_{ip} \quad (3.93)$$

la minimització dels temps de finalització de les operacions (*makespan*) en els diferents períodes que fa minvar alhora els costos de temps i ajuda a la maximització de la producció:

$$\min T_q \quad (3.94)$$

i la substitució de la funció de costos d'estoc i retard per un objectiu general del tipus:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P |QT_{ip} - DT_{ip}|^2 \quad ; \quad \min \sigma^2 \quad (3.95)$$

Diverses estratègies de solució del problema de planificació poden ser suggerides a partir d'aquest esquema general atenent les particularitats i circumstàncies especials de cada cas concret.

3.3. Emmagatzemament intermig

Per a la descripció que es fa de l'emmagatzemament intermig en aquest treball cal ampliar la recepta de cada producte per incloure les etapes d'estoc intermedi i els seus equips associats, els dipòsits. D'aquesta manera i depenent dels productes es procedeix a la divisió de les receptes en zones. Tal i com indica la taula 3.1, cada una de les zones correspondrà a un grup de tasques consecutives que formen un subtren per a la producció d'un intermedi estable que es pot emmagatzemar indefinidament (FIS).

A resultes d'això, cal ampliar la variable binària que permet descriure les possibilitats d'assignació de tasques a equips per tal d'incloure la distribució per zones:

$$x_{ijm} \rightarrow x_{ijmz} \in \{0,1\} \quad (3.96)$$

També cal ampliar, és clar, la variable d'assignació:

$$X_{ijkmn} \rightarrow X_{ijkmnz} \in \{0,1\} \quad (3.97)$$

on ara n correspondrà al lligam entre tots els esdeveniments que acaben produint una quantitat d'intermedi estable que anomenarem minilot.

Taula 3.1. Exemple de la partició de les receptes dels productes en zones

Producte A		Producte B		Producte C	
Tasca j	Zona z	Tasca j	Zona z	Tasca j	Zona z
1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	2	1
3	1	3	1	3	1
4	1	4	1	4	1
Emmagatzematge		5	1	Emmagatzematge	
5	2	6	1	5	2
6	2	Emmagatzematge		6	2
7	2	7	2	7	2
Emmagatzematge		8	2	8	2
8	3	9	2	9	2
9	3	10	2	Emmagatzematge	
10	3	-	-	10	3
11	3	-	-	11	3
12	3	-	-	12	3

Les restriccions d'assignació també es veuran afectades:

$$X_{ijklmnz} \leq x_{ijmz} \quad \forall i,j,k,l,m,n,z \quad (3.98)$$

Les restriccions de capacitat romandran similars pels equips discontinus:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M X_{ijklmnz} \eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}} = B_{inz} \quad \forall i,j,n,z \quad (3.99)$$

però les restriccions de demanda s'han d'extendre a cada zona:

$$Q_i = \sum_{n=1}^N B_{inz} \leq D_i \quad \forall i,z \quad (3.100)$$

L'expressió 3.100 garanteix el compliment del balanç de matèria i suposa per tant que no hi ha demanda addicional dels productes intermedis. Però aquesta és una restricció insuficient per un model que vol contemplar el detall dels instants en els quals tenen lloc els esdeveniments. Així, doncs, és necessari considerar en quins moments es produeixen cada un dels minilots per tal de saber quan s'omplen i es buiden els dipòsits i controlar d'aquesta

manera que no se superin les respectives capacitats ni es violin les restriccions de precedència en l'ordre de producció de les quantitats d'intermedis.

Llavors cal definir perfil temporal del nivell d'utilització del dipòsit. Si no es consideren subtasques o bé si es consideren ompliments i buidaments instantanis aquest perfil s'expressa:

$$L_{iz}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{ijkmnz} B_{inz} \theta(TF_{km} - t) - X_{ijkmn,z+1} B_{in,z+1} \theta(TI_{km} - t) \quad \forall i, z \quad (3.101)$$

Aquest nivell ha de complir:

$$0 < L_{iz}(t) < L_{iz}^{\max} \quad \forall i, z, t \quad (3.102)$$

$$L_{iz}(0) = 0 \quad ; \quad L_{iz}(H) = 0 \quad \forall i, z \quad (3.103)$$

i, a més, per tots aquells parells d'intermedis, iz i $i\zeta$, que comparteixin dipòsits:

$$L_{iz}(t) \cdot L_{i\zeta}(t) = 0 \quad \forall t \quad (3.104)$$

Si es considera l'ompliment i el buidat dels dipòsits i les corresponents l'expressió del perfil esdevindrà més complexa. S'anomenen τ_1 , τ_2 , τ_3 i τ_4 els instants en què comencen i acaben d'operar, respectivament, l'equip semicontinu que omple el dipòsit (km) i el que el buida ($k\mu$):

$$\tau_1 = TI_{km} + t_{km1} \quad (3.105)$$

$$\tau_2 = TI_{km} + t_{km1} + t_{km2} \quad (3.106)$$

$$\tau_3 = TF_{k\mu} - t_{k\mu4} - t_{k\mu5} \quad (3.107)$$

$$\tau_4 = TF_{k\mu} - t_{k\mu5} \quad (3.108)$$

Llavors, si s'imposa en primera aproximació que cal completar l'ompliment des de la zona anterior al dipòsit ($z-1$) abans no comenci el buidat cap a la zona posterior, l'equació 3.101 resultarà:

$$L_{iz}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{ijkmnz} B_{inz} \theta(\tau_2 - t) - X_{ijkmn,z+1} B_{in,z+1} \theta(\tau_3 - t) \quad \forall i, z \quad (3.109)$$

Si, d'acord amb el model se suposa flux lineal per als semicontinus (eqns. 3.10 i 3.12 o bé 3.57) i és necessari contemplar el cavalcament parcial de les operacions d'ompliment i buidament, el perfil d'ocupació de l'emmagatzematge es complicarà notablement i s'haurà d'expressar de la següent manera:

$$L_{iz}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{ijkmnz} B_{inz} \Theta^{\tau_1, \tau_2}(t) - X_{ijkmn, z+1} B_{in, z+1} \Theta^{\tau_1, \tau_2}(t) \quad \forall i, z \quad (3.110)$$

on:

$$\Theta^{t_1, t_2}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq t_1 \\ \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} & \text{si } t_1 < t < t_2 \\ 1 & \text{si } t \geq t_2 \end{cases} \quad (3.111)$$

En qualsevol cas (eqns. 3.101, 3.109, 3.110) la descripció del perfil d'ocupació de l'estoc d'intermedis és conceptualment equivalent a la dels perfils de demanda de serveis generals. L'aplicació de restriccions (eqns. 3.102, 3.103 i 3.104) sobre aquests perfils comportarà la necessitat de desfassar aquelles operacions la coincidència de les quals en el temps suposa una demanda de recursos superior als disponibles.

Una possible solució d'aquest tipus de problemes consisteix en la discretització de l'horitzó de temps i en l'acceptació dels desavantatges exposats al capítol 2. Tanmateix també és possible, tal i com es farà en aquest treball, l'enumeració cronològica dels instants en els quals esdevenen les demandes de recursos limitats.

OPTIMITZACIÓ

4. OPTIMITZACIÓ

Un cop establerts model i objectiu cal buscar els mètodes adequats per resoldre el problema d'optimització. El capítol següent presenta diferents estudis de casos de complexitat creixent. Les metodologies de solució emprades, que han de trobar l'equilibri entre esforç de càlcul i qualitat dels resultats obtinguts, van paral·leles a l'augment de la complexitat dels problemes, des de l'optimització rigorosa de la programació matemàtica fins l'obtenció de resultats subòptims mitjançant tècniques heurístiques.

4.1. Mètodes rigorosos

S'intentarà, en primer lloc, resoldre rigorosament els problemes de la programació d'operacions i la planificació de la producció. Per això s'empraran els mètodes matemàtics ja coneguts i dels quals es disposa comercialment. El problema és plantejarà utilitzant la modelització detallada necessària per descriure correctament i acurada l'operació de les BCPI per a la qual cosa caldrà renunciar tant al problema de la planificació de la producció com al tractament de la limitació de recursos i de la utilització de dipòsits d'emmagatzemament.

El problema de considerar l'operació a mig-llarg termini queda completament descartat només de conèixer els temps de càlcul necessaris per als problemes d'uns quants lots que es presenten en els exemples. Quant a la programació d'operacions, aquesta es veu progressivament desvirtuada a mida que, per resoldre casos més complexos, cal abandonar la consideració de subtasques i equips semicontinus. Així doncs, es veurà com el tractament rigorós presenta limitacions en molts casos i resulta inviable per als casos de caire més multipropòsit.

4.1.1. Eines existents: el paquet GAMS.

Existeixen diferents paquets de programes per a la resolució de problemes de programació lineal (incloent-hi variables binàries) i no lineal dels quals es disposa comercialment o bé a

través de les xarxes informàtiques internacionals (*free software*). Entre els més coneguts cal destacar, per a l'optimització algebraica amb restriccions (igualtats i desigualtats):

- GRG (*Generalized Reduced Gradient*, L. Lansdon et al., 1978)
- SQP (*Successive Quadratic Programming*, L.T. Biegler, 1988)
- MINOS (*Modular In-core Nonlinear Optimization System*, B.A. Murtag i M.A. Saunders, 1987)

i quan a la programació lineal:

- MPSX (*Mathematical Programming System Extended*, IBM, 1978)
- SCICONIC (Scicon Ltd., 1986)
- MINOS (*Modular In-core Nonlinear Optimization System*, B.A. Murtag i M.A. Saunders, 1987)
- ZOOM (*Zero One Optimization Method*, R. Marsten, 1986)

Tots aquests sistemes es basen en els mètodes SIMPLEX, la descomposició de Benders (GBD) i l'aproximació exterior (OA) per a la resolució dels problemes continus i utilitzen tècniques de ramificació i acotació (B&B) amb diverses heurístiques per als problemes sencers. Més recentment apareixen millores com la inclusió de funcions de penalització en l'aproximació exterior:

- DICOPT (*Discrete and Continuous Optimizer*, J. Viswanathan i I.E. Grossmann, 1990)

o bé permeten a l'usuari més flexibilitat per controlar el procés de cerca durant la ramificació i acotació (*open software architecture*):

- MINTO (*Mixed Integer Optimizer*, Savelsbergh et al., 1991)
- OSL (*Optimization Subroutine Library*, IBM, 1990)

Adicionalment, existeixen altres programes de suport (*frameworks*) que permeten una millor comunicació entre els anteriors i l'usuari i resulten molt pràctics per a la introducció dels models (*interface*). El GAMS (*General Algebraic Modelling System*, Brooke et al. 1988) és un programa comercial d'aquestes característiques. La seva utilització possibilita la l'escriptura del model en format pseudo-matemàtic, llavors:

$$\sum_i a_{ij} x_{ij} \leq U_j^{\max} \quad \forall j \quad [\text{eq.7}] \quad (4.1)$$

s'introdueix com:

$$\text{EQUACIO_7 (J) } \dots \text{SUM (I, A (I, J) *X (I, J)) } =\text{LE}= \text{UMAX (J) } ; \quad (4.2)$$

i el GAMS desenvolupa tot el conjunt d'equacions corresponents per a l'entrada de dades per al paquet que es pretengui utilitzar a continuació (MINOS, OSL,...). A més, porta a terme un cert control de la coherència del model, deixa a l'usuari controlar amb facilitat els formats i extensió dels fitxers de resultats, etc. Aquests i altres avantatges fan que sigui un paquet àmpliament utilitzat arreu i amb moltes referències a la literatura.

Finalment, cal fer esment, també, de l'ASCEND (Westerberg, 1992) que presenta un llenguatge de simulació orientat a objectes però que de moment es limita a l'àmbit acadèmic.

4.1.2. Exemples.

Els exemples que es presenten a continuació van des del cas multiproducte fins al multipropòsit i mostren les possibilitats que ofereix el tractament rigorós del problema mitjançant els paquets comercials GAMS i OSL en situacions de complexitat creixent utilitzant un ordinador personal tipus PC486-66. Els models, tant multiproducte com multipropòsit, han estat reformulats per evitar les no linealitats dels models tal i com foren exposats en el capítol anterior.

Per altra banda, tant la utilització dels serveis com de l'emmagatzemament es consideren mitjançant funcions gràfic de les variables independents (eqns. 3.20, 3.68 i 3.101). Per al GAMS, que sí permet funcions gràfic sobre paràmetres, es tracta d'operacions endògenes sobre variables "desconegudes", en definitiva, de funcions no derivables. És per això que aquests dos aspectes no podran ser considerats.

El problema que es planteja en tots els exemples és la minimització del temps de finalització de totes les tasques (*makespan*) per a uns valors fixats de demanda. Es tracta de la funció objectiu més simple i la facilitat de la seva minimització indica la viabilitat per al plantejament i solució de problemes amb objectius més complexos (funcions de cost, etc.). Els resultats als problemes plantejats es resumiran amb els valors obtinguts de la funció objectiu i una representació del diagrama de Gantt.

4.1.2.1. Cas multiproducte estricte: EXEMPLE_1

S'ha establert com a punt de partida un exemple multiproducte estricte per tal de constatar el salt en el nivell de dificultat que suposa després la resolució dels problemes multipropòsit. En aquest primer exemple se segueix el model multiproducte proposat (eq 3.5 a 3.34), s'adopta la política d'espera finita (FW) i es consideren totes les subtasques del model: tasques de transferència associades als equips semicontinus i tasques de preparació i de neteja penalitzades per canvi de producte.

Model matemàtic

Les penalitzacions, però han estat reformulades per tal d'eliminar el producte de variables binàries de l'expressió del seu càlcul (eqns. 3.9 i 3.13). La penalització per canvi de producte es calcula linealment (eqns. 4.7 i 4.10) gràcies als paràmetres α_i associats als productes (que substitueixen la matriu de penalitzacions) els paràmetres β_j associats a les tasques i un paràmetre Δ que serveix de fons d'escala. Així, la penalització s'estableix en funció del canvi d'índex α corresponent a un hipotètic grau de contaminació o d'embrutament. Quant el canvi de producte no està definit, en el primer i l'últim lot, llavors la penalització es calcula a partir d'un altre paràmetre σ .

El model és el següent:

$$\min Z \geq TF_{jn} \quad \forall j,n \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^I Y_{in} = 1 \quad \forall n \quad (4.4)$$

$$\sum_{n=1}^N Y_{in} = 1 \quad \forall i \quad (4.5)$$

$$t_{jn1} = \begin{cases} \beta_j \left(\sum_{i=1}^I Y_{in-1} \alpha_i - \sum_{i=1}^I Y_{in} \alpha_i + \Delta \right) & \text{si } n > 1 \\ \beta_j \sigma & \text{si } n = 1 \end{cases} \quad \forall j,n \quad (4.6)$$

$$t_{jn2} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \frac{B_i S_{ij-1}}{V_{j-1}} (1-z_j) \quad \forall j,n \quad (4.7)$$

$$t_{jn3} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \frac{B_i S_{ij}}{V_j} z_j + \sum_{i=1}^I Y_{in} TP_{ij} (1-z_j) \quad \forall j,n \quad (4.8)$$

$$t_{jn4} = \sum_{i=1}^I Y_{in} \frac{B_i S_{ij+1}}{V_{j+1}} (1-z_j) \quad \forall j,n \quad (4.9)$$

$$t_{jn5} = \begin{cases} \beta_j \left(\sum_{i=1}^I Y_{in} \alpha_i - \sum_{i=1}^I Y_{in+1} \alpha_i + \Delta \right) & \text{si } n < N \\ \beta_j \sigma & \text{si } n = N \end{cases} \quad \forall j,n \quad (4.10)$$

$$TF_{jn} = TI_{jn} + TW_{jn} + \sum_{s=1}^S t_{jns} \quad \forall j,n \quad (4.11)$$

$$TI_{jn} \geq TF_{jn-1} \quad \forall j,n \geq N \quad (4.12)$$

$$TI_{j+1,n} = TI_{jn} + t_{jn1} + [t_{jn2} + t_{jn3} + TW_{jn}] (1-z_j) - t_{j+1,n1} \quad \forall j,n \quad (4.13)$$

$$TW_{jn} \leq \sum_{i=1}^I Y_{in} TW_{ij}^{\max} \quad \forall j,n \quad (4.14)$$

D'aquesta manera queda plantejat un problema de programació lineal mixta amb variables contínues TI_{jn} i binàries Y_{in} (MILP).

Dades del problema

Aquest model s'utilitza per resoldre el següent problema de seqüenciació de lots on l'objectiu escollit és la minimització del temps de finalització de les operacions (*makespan*). Existeixen cinc productes diferents que tenen una demanda especificada en lots de quantitats fixades.

Les receptes d'aquest cinc productes consten de tretze tasques, sis de discontinües i set de semicontínues alternadament ($z_j = 0$ per j parell i $z_j = 1$ per j senar). Les tasques discontinües es diferencien pels seus diferents temps de procés TP_{ij} depenents dels productes.

Taula 4.1. Descripció de demandes i productes.

PRODUCTE	P1	P2	P3	P4	P5
N. de LOTS	1	2	3	2	1
QUANTITAT	500	1000	1500	1000	500
ÍNDEX α	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00

Taula 4.2. Temps de procés TPij per a les tasques discontinúes.

	T2	T4	T6	T8	T10	T12
P1	3,5	4,5	8,5	3,0	10,5	8,5
P2	4,0	5,5	3,5	13,5	4,5	18,0
P3	3,5	7,5	6,0	5,0	7,0	9,5
P4	12,0	3,5	8,0	8,5	4,0	3,0
P5	7,0	10,5	2,0	4,0	9,0	5,0

Per cada tasca s'ha introduït un factor de neteja β_j igual a u per les unitats semicontínues i igual a dos per a les discontinúes. El fons d'escala Δ s'ha fixat a u i el factor σ a dos. Per cada tasca també existeixen diferents temps d'estabilitat no nuls si es tracta d'operacions discontinúes.

Taula 4.3. Temps d'estabilitat per a les tasques discontinúes.

	T2	T4	T6	T8	T10	T12
P1	1	2	3	4	5	6
P2	6	1	2	3	4	5
P3	5	6	1	2	3	4
P4	4	5	6	1	2	3
P5	3	4	5	6	1	2

La capacitat dels equips és de 500 unitats de producció per als equips discontinus i de 400 unitats de producció per unitat de temps per als equips semicontínus. Si bé el temps de procés de les unitats discontinúes ve especificat directament com a dada, el temps de transferència a les unitats semicontínues es calcula a partir de la càrrega processada i el factor de capacitat (fixat a u en tots els casos).

Resultats

La mesura de la complexitat del problema té dos vessants. Per una banda cal esmentar el significatiu número de tasques i de lots i sobretot el nivell de detall que es contempla. Això queda ben palès en el diagrama de Gant que representa la solució obtinguda (Fig. 4.1) en el

qual es fa evident la necessitat del color per copsar tota la informació tractada. D'altra banda, però, la combinatòria del problema no és exagerada: el número de variables binàries Y_{in} ve determinat pel producte de lots i productes i l'arbre de possibilitats és de 2^{45} (i un número no gaire més gran de nodes a explorar durant el procés de ramificació i acotació).

Taula 4.4. Dimensions del problema.

Lots N	Productes I	Variables Y_{in}	Combinacions
9	5	45	$3,52 \cdot 10^{13}$

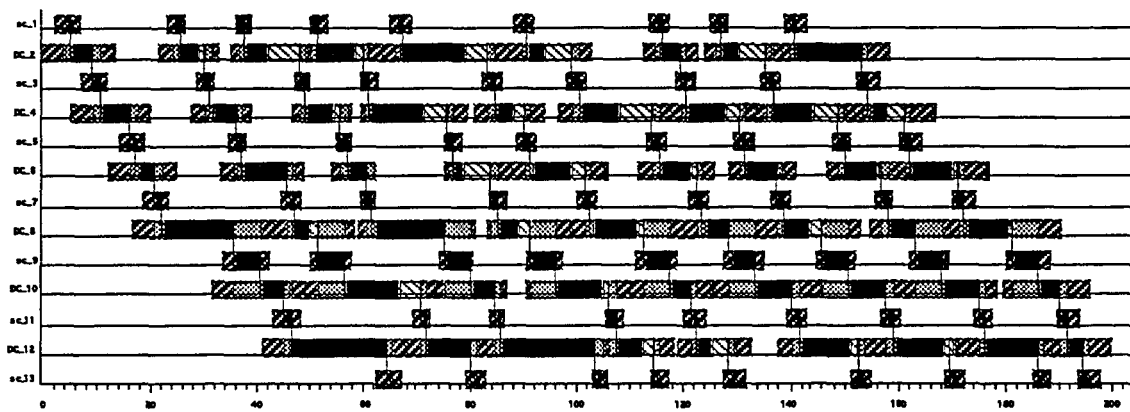


Fig. 4.1. Resultat per l'EXEMPLE_1. El gràfic ampliat és a l'apèndix.

Els resultats s'obtenen en temps de càlcul no gaire elevats. La solució del problema relaxat, tal i com es presenta a la taula 4.5, dona un *makespan* de 187,55 unitats de temps. Un resultat per sota la cota inferior en només un 10% s'obté en 95 segons i el procés de càlcul convergeix finalment en l'òptim al cap de 10 minuts, 9916 iteracions i 578 nodes explorats durant el procés de ramificació i acotació (B&B).

Taula 4.5. Resultats obtinguts per a l'EXEMPLE_1.

Solució relaxada	Cota inferior	Millor solució factible	Aproximació	Iteracions	Nodes (B&B)	Temps de càlcul
187,55	187,55	201,25	7,3%	2646	1	95 s.
187,55	199,50	199,50	0%	9916	578	665 s.

Cal remarcar el bon punt de partida que representa la solució del problema relaxat per al procés posterior de ramificació i acotació (Taula 4.6). Els valors obtinguts permeten discriminar els millors nodes a considerar. Així, la cota inferior es va recalculant i augmentant a mida que es descarten nodes, alhora que la funció objectiu va minvant. En

coincidir ambdós valors s'assoleix l'òptim, determinat pels valors de les variables binàries de la taula 4.7.

Taula 4.6. Solució del problema LP resultant de la relaxació de les variables binàries.

Y_{in}	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7	n = 8	n = 9
i = 1	0,420	0,253	0,129	0,128	0	0	0	0,070	0
i = 2	0,580	0,256	0,493	0,040	0,214	0,092	0,098	0,228	0
i = 3	0	0	0	0,832	0,634	0,844	0,690	0	0
i = 4	0	0,188	0,379	0	0,152	0,064	0,212	0,005	1
i = 5	0	0,303	0	0	0	0	0,005	0,697	0

Taula 4.7. Solució òptima del problema.

Y_{in}	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6	n = 7	n = 8	n = 9
i = 1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
i = 2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
i = 3	0	0	0	0	0	1	1	1	0
i = 4	0	0	0	0	1	0	0	0	1
i = 5	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Una última consideració a fer sobre aquest primer exemple és la dels temps d'espera (TW) aparentment innecessaris que mostra el diagrama de Gantt de la figura 4.1. Però la funció objectiu escollida és degenerada i existeixen múltiples solucions corresponents al valor òptim. Malgrat que alguns temps d'espera no siguin necessaris, són del tot possibles ja que no modifiquen el valor del temps de finalització de l'última tasca.

4.1.2.2. Model multipropòsit per a un cas multiproducte: EXEMPLE_2

En el següent cas s'ha emprat ja el model multipropòsit. El problema plantejat, però, continua essent multiproducte ja que les receptes han estat fixades amb un únic equip possible per cada tasca i la mateixa seqüència d'equips per tots els productes (*flowshop*). Es tracta d'un problema de seqüenciament de lots que es planteja com un problema d'assignació i seqüenciament d'equips.

Dades del problema

El problema s'ha plantejat amb tres productes i tres tasques. Si bé es tracta d'un exemple més senzill que l'anterior, la magnitud del problema ha canviat de (I·N) a (I·J·K·M·N). S'ha renunciat al tractament de subtasques i equips semicontinus. Igualment, donat que aquest exemple tan senzill no ho necessita, no es considera tampoc l'ocupació dels equips (η_{km}) amb la qual cosa no es podrien considerar ni dimensions de lot variables ni equips que es reparteixin la càrrega a processar.

Se suposen tres productes diferents i una demanda d'un lot de cada un d'ells. L'assignació d'equips és la mateixa per totes les tasques de manera que les úniques dades que resten són les de temps de procés que es troben a la taula 4.8 i els temps d'estabilitat que es consideren tots iguals a 10. Es pot comprovar com aquest problema ha estat plantejat amb la intenció que el resultat sigui evident i que es pugui resoldre aplicant regles clàssiques simples com ara la dels trapezis (Companys, 1989).

Taula 4.8. Temps de procés TP_{ij} per a l'EXEMPLE_2.

	T1	T2	T3
P1	10.0	3.0	1.0
P2	1.0	7.0	2.0
P3	1.0	2.0	5.0

Model matemàtic

A continuació s'exposa el model que s'utilitzarà i que és el resultat de la substancial simplificació que s'ha fet del model exposat al capítol 3. Això no obstant, han estat introduïdes restriccions addicionals de tall sobre l'assignació de lots (Y_{in}). D'aquesta complicació en resulta un problema més lligat (*tight*) i una reducció de més de 3,5 vegades del temps limitant dedicat al procés B&B. També és necessària una variable intermèdia $XT_{ijklmnp\mu}$ per evitar el producte de variables binàries.

$$\min Z \geq TF_{km} \quad \forall km \quad (4.15)$$

$$X_{ijkmn} \leq x_{ijm} \quad \forall ijkmn \quad (4.16)$$

$$XT_{ijklmnp\mu} \leq x_{ijm} \quad \forall ijkmp\mu \quad (4.17)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M X_{ijkmn} = Y_{in} \quad \forall ijkmn \quad (4.18)$$

$$\sum_{n=1}^N Y_{in} = 1 \quad \forall in \quad (4.19)$$

$$\sum_{i=1}^I Y_{in} = 1 \quad \forall in \quad (4.20)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} = 1 \quad \forall km \quad (4.21)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M X_{ijkmn} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M X_{i1kmn} \quad \forall ijn \quad (4.22)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} = 1 \quad \forall ij \quad (4.23)$$

$$TF_{km} = TI_{km} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} + TW_{km} \quad \forall km \quad (4.24)$$

$$XT_{ijkmn\kappa\mu} \leq X_{ijkmn} \quad \forall ijkmn \quad (4.25)$$

$$XT_{ijkmn\kappa\mu} \leq X_{i,j+1,kmn} \quad \forall ijkmn \quad (4.26)$$

$$XT_{ijkmn\kappa\mu} \geq X_{ijkmn} + X_{i,j+1,\kappa\mu n} - 1 \quad \forall ijkmn\kappa\mu \quad (4.27)$$

$$TF_{km} - TI_{km} \geq (1 - XT_{ijkmn\kappa\mu}) (-TMAX) \quad \forall ijkmn\kappa\mu \quad (4.28)$$

$$TF_{km} - TI_{km} \leq (1 - XT_{ijkmn\kappa\mu}) (+TMAX) \quad \forall ijkmn\kappa\mu \quad (4.29)$$

$$TI_{k+1,m} \geq TF_{km} \quad \forall km \quad (4.30)$$

$$TW_{km} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N X_{ijkmn} TW_{ijm}^{\max} \quad \forall km \quad (4.31)$$

on TMAX és un número positiu suficientment gran. És clar que torna a tractar-se d'un problema de programació lineal mixta amb variables binàries (MILP) però d'una magnitud ara molt superior (Taula 4.9) a de l'EXEMPLE_1 (Taula 4.4).

Taula 4.9. Dimensions del problema EXEMPLE_2.

I	J	K	M	N	Variables X_{ijkmn}	Combinacions
3	3	3	3	3	243	$1,413 \cdot 10^{73}$

Resultats obinguts

El resultat obtingut és el de la figura 4.2 en la qual tornen a aparèixer esperes innecessàries. El temps de càlcul emprat és ara de l'ordre de 40 minuts que és molt elevat per a un problema tant trivial (Taula 4.10).

Taula 4.10 . Resultats obtinguts per a l'EXEMPLE_1.

Solució relaxada	Cota inferior	Millor solució factible	Aproximació	Iteracions	Nodes (B&B)	Temps de càlcul
12	16	17	6,25%	30102	761	2319 s.
12	17	17	0%	30247	763	2437 s.

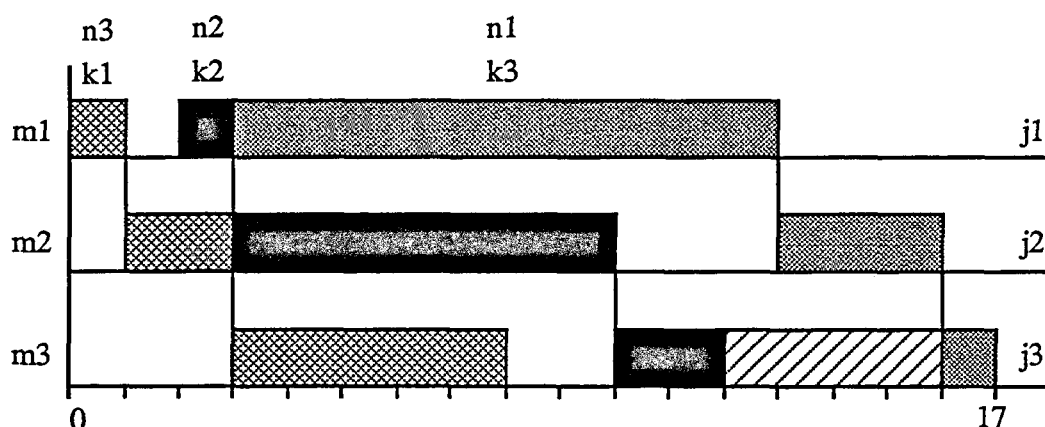


Fig. 4.2. Model multipropòsit. Cas multiproducte amb ruta única.

En aquest cas la solució relaxada no resulta tant bon punt de partida. De fet, tenint en compte que l'assignació de tasques a equips ja ve prèviament determinada per la recepta, l'única decisió real que cal prendre és l'ordre en el qual aquests equips processen els diferents productes (índex k) i, en aquest aspecte, la solució relaxada dóna molt poca informació (Taula 4.11).

És per això que en aquest cas cal explorar molts més nodes i invertir més temps. No tan sols perquè el punt de partida és dolent sinó també perquè el problema és més gran. Tot i això, la cota inferior inicial va prenent valors més elevats a mida que es resolen els nous problemes LP de cada node. D'aquesta manera, en coincidir la cota inferior amb una solució entera

factible, es pot assegurar que la solució que ja s'obtenia acceptant una tolerància del 10% és també la solució òptima.

Taula 4.11. Comparació de les solucions relaxada i final.

SOLUCIÓ RELAXADA					
i	j	k	m	n	X_{ijkmn}
1	1	1	1	2	0,500
		2			0,500
		3			0
	2	1	2		0
		2			0,500
		3			0,500
	3	1	3		0
		2			0,500
		3			0,500
2	1	1	1	3	0,333
		2			0,333
		3			0,333
	2	1	2		0,333
		2			0,333
		3			0,333
	3	1	3		0,333
		2			0,333
		3			0,333
3	1	1	1	1	0,167
		2			0,167
		3			0,667
	2	1	2		0,667
		2			0,167
		3			0,167
	3	1	3		0,667
		2			0,167
		3			0,167

SOLUCIÓ ÒPTIMA					
i	j	k	m	n	X_{ijkmn}
1	1	3	1	2	1,000
	2	3	2	2	1,000
	3	3	3	2	1,000
2	1	2	1	1	1,000
	2	2	2	1	1,000
	3	2	3	1	1,000
3	1	1	1	1	1,000
	2	1	2	1	1,000
	3	1	3	1	1,000

4.1.2.3. Model multipropòsit per a un cas multiproducte: EXEMPLE_3

El mateix model anterior s'emprarà, ara sí, per resoldre un problema realment multipropòsit. L'exemple contempla rutes de producció diferents per a cada producte i correspon, per tant, a un cas de flux general (*jobshop*). Tot i que el model ho permet, no es consideren equips alternatius i l'assignació de taques a equips (Taules 4.10 i 4.11) és única. Tanmateix, la correcta resolució del problema requereix la determinació de les diferents seqüències de tasques i productes que han d'experimentar cada un dels equips. En definitiva, cal utilitzar el model multipropòsit.

Dades del problema

Se suposa una planta amb quatre reactors que ha de fabricar quatre lots de quatre productes diferents. La recepta de cada un d'aquests productes consta de tres tasques que cal realitzar utilitzant només tres dels quatre equips en ordres diferents. Les dimensions del nou problema es mostren a la taula 4.12.

Taula 4.12. Dimensions del problema.

I	J	K	M	N	Variables X_{ijkmn}	Combinacions
4	3	4	4	4	768	10^{231}

Taula 4.13. Possibilitats d'assignació d'equips a tasques.

	i = 1			i = 2			i = 3			i = 4		
x_{ijm}	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3
m = 1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
m = 2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
m = 3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
m = 4	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Taula 4.14. Temps de procés per a les diferents assignacions possibles.

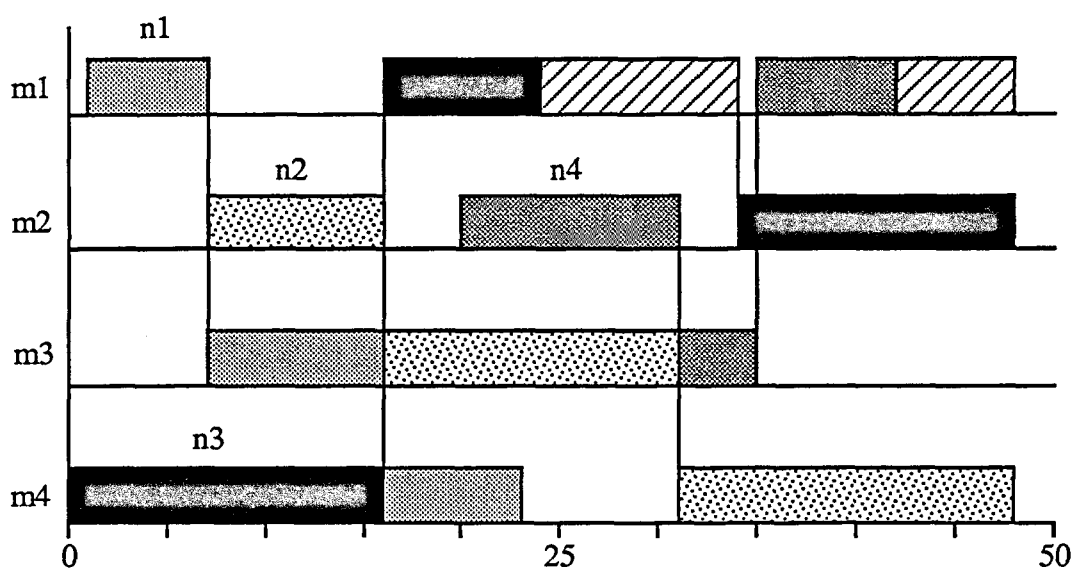
	i = 1			i = 2			i = 3			i = 4		
x_{ijm}	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3	j = 1	j = 2	j = 3
m = 1	6	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	4
m = 2	-	-	-	9	-	-	-	-	16	7	-	-
m = 3	-	9	-	-	15	-	-	-	-	-	11	-
m = 4	-	-	7	-	-	17	8	-	-	-	-	-

Resultats obtinguts

L'únic resultat obtingut es resumeix en el diagrama de Gantt de la figura 4.3. Intuïtivament sembla prou bo i fins i tot podria ser l'òptim però, després de gairebé 28 hores de càlcul el procés de cerca ha estat interromput i tant sols es pot assegurar que el corresponent valor de la funció objectiu (*makespan*) és un 20% superior a la cota inferior (Taula 4.15).

Taula 4.15. Resultats obtinguts per a l'EXEMPLE_3. La cerca s'ha limitat a 10^5 s. de càlcul.

Solució relaxada	Cota inferior	Millor solució factible	Aproximació	Iteracions	Nodes (B&B)	Temps de càlcul
40	40	48	20%	308838	5985	100086 s.

Fig. 4.3. Model multipropòsit (*jobshop*).

El problema que queda palès en aquest exemple és la dificultat, no tan sols de garantir l'optimalitat d'una solució, sinó de mesurar la seva bondat. Una aproximació del 20% és molt dolenta. Llavors, malgrat la solució ja sigui segurament la òptima, o hi sigui molt a prop a la vista del diagrama de Gantt, l'única alternativa és continuar l'enumeració. I la subsegüent necessitat de temps és la que reflexa aquest exemple.

Limitacions

D'aquests exemples es desprenen les importants limitacions dels mètodes rigorosos disponibles per tractar el problema de la programació de les operacions amb el nivell de detall plantejat, sobretot en saltar del cas multiproducte al multipropòsit. Aquestes limitacions no són tan sols de temps sinó també de memòria. Mentre que el primer exemple ocupava 1,76 Mb de memòria RAM, el segon exemple en necessitava 2,46 i el tercer 3,32 Mb. Així, problemes de magnitud superior no es poden resoldre per manca de memòria. Malgrat tot la disponibilitat de memòria dels ordinadors creix tant ràpidament que, pensant en el futur immediat, el que resulta realment limitat és el temps.

Evidentment, els temps de càlcul són molt grans i es fa impensable intentar abordar problemes majors. El temps de finalització de les operacions (*makespan*), que és l'objectiu més simple de seqüenciació, té una cota inferior molt dolenta i la solució del problema relaxat s'obté amb valors molt distants de 0 o 1 per a les variables binàries. Per una banda, el procés de ramificació i acotació necessita explorar molts nodes. D'altra banda, la convergència del procés és molt difícil donada la gran diferència entre les solucions enteres que es van trobant i la cota inferior.

A més a més, encara falta incloure la ocupació dels equips (η_{km}) en el plantejament del problema per tal de considerar les possibilitats de repartir una lot en diferents càrregues d'un grup d'equips treballant en fase. Aquest aspecte no tan sols comportaria un increment de les dimensions del problema (i dels temps de càlcul) sinó que també implica una reformulació addicional del problema per tal d'evitar el producte de variables contínues i binàries ($\eta_{km} \cdot X_{ijkmn}$) que el GAMS no admet.

4.2. Mètodes aproximats

Els mètodes rigorosos emprats fins aquest punt presenten serioses limitacions en la resolució de problemes acadèmics de dimensions reduïdes. No és desencertat pensar, doncs, que aquests mètodes seran inefficients davant problemes industrials d'una magnitud superior. És per això que a continuació es planteja la cerca d'alguna alternativa que sigui capaç de tractar amb tota la complexitat plantejada en els models, tot renunciant a les solucions òptimes en favor de les subòptimes.

El primer pas el constitueix el desenvolupament d'una eina informàtica capaç de simular i avaluar detalladament programes d'operacions multipropòsit. Tot seguit, caldrà procedir a la implementació de regles i estratègies per a la generació de diversos programes d'operacions alternatius que permetin arribar a la identificació de solucions acceptables per als diferents problemes de programació d'operacions i planificació de la producció.

4.2.1. Eines existents: el paquet MOPP.

Dins l'àmbit acadèmic es poden trobar alguns paquets informàtics per a la simulació i gestió de l'operació de plantes químiques de funcionament discontinu. D'entre ells, en aquest treball de tesi s'ha optat per motius obvis pel paquet MOPP (*Multi-Operation Production Planning*)

del Departament d'Enginyeria Química (Lázaro et al., 1989a, 1989b) ja que s'ha contribuït d'aquesta manera al seu desenvolupament.

D'entre els altres mereixen especial atenció:

- MULTI-BATCH (Sparrow et al., 1974).
- BATCHESS (Joglekar i Reklaitis, 1984; Batch Process Technologies, 1988).

El primer té el seu lloc per motius històrics (Cap. 2). Sparrow i col.laboradors (1974) presentaren el primer paquet informàtic per a la comprovació del funcionament d'una planta multiproducte i l'utilitzaren com a eina per a la planificació i el disseny de plantes (Sparrow et al., 1975). El segon, perquè es tracta d'un simulador comercialitzat i utilitzat tant industrialment com acadèmica. Per aquest fet la literatura recull els resultats d'aplicacions a casos particulars (per exemple a la indústria cervesera: Mignon i Hermia, 1993). Tot i la seva utilitat, però, continua tractant-se només d'una eina de simulació que permet la validació dels dissenys o modes d'operació proposats per altres vies.

El MOPP és un paquet per a processos multiproducte que, suportat per un simulador, fa tasques d'anàlisi de campanyes i planificació de la producció en un horitzó multiperíode. Més detalls i possibilitats d'aquest paquet es troben també en altres treballs previs (Espuña, 1994).

4.2.1.1. Nivells de detall. Ordres de fabricació de productes: OFP.

El MOPP es basa en el mode d'operació en campanya per a les quals abstreu paràmetres generals com ara productivitat i temps de cicle. Cada campanya és la repetició d'una seqüència determinada de rutes producció assignades cada una d'elles unívocament a un sol producte. Correntment, es parla de seqüències de productes encara que, de fet, es tracta de seqüències d'ordres de fabricació de lots de productes acabats (OFP). Cada ordre de fabricació es compon del conjunt ordenat de totes les tasques de la recepta del producte, les quals estan evidentment assignades a un únic equip possible. Llavors, l'únic esdeveniment possible per a cada tasca i lot es confon amb la pròpia tasca.

La taula 16 resumeix la jerarquia dels diferents nivells d'actuació i decisió que es consideren i també de llurs conseqüències. Una campanya es defineix com una llista ordenada de rutes de producció que donarà lloc a un determinat conjunt de lots de productes finals. Cada ruta s'interpretarà com una ordre de fabricació compacta i cada una de les successives tasques

involucrades donarà lloc a la quantitat necessària d'intermedi per assolir el lot de producte acabat.

Taula 4.16. Nivells de detall del simulador multiproducte.

Accions	Assignació	Resultat	Producció
Campanya	Llista de rutes	Conjunts de lots	Productes finals
Ordre (producte)	Rutes	Un lot	Producte final
Tasca (esdeveniment)	Equips	Un lot	Intermedi

```

Per repetició = 1 → NÚMERO_REPETICIONS(campanya)
  ruta = RUTA(campanya)

  Per ordre = 1 → NÚMERO_ORDRES(ruta)
    producte = PRODUCTE(ruta,ordre)
    lot = LOT(producte)

    Per tasca = 1 → NÚMERO_TASQUES(producte)
      equip = EQUIP(producte,tasca)
      esdeveniment = esdeveniment + 1

      Simulació de temps { TEMPS_INICI(esdeveniment) =
                           f(producte,tasca,equip,lot),
                           TEMPS_FINAL(esdeveniment) =
                           f(producte,tasca,equip,lot),
                           ...}

      DISPONIBILITAT(equip) = TEMPS_FINAL(esdeveniment)
    fi
  Simulació de producció { PRODUCCIÓ(producte) =
                           PRODUCCIÓ(producte) + lot,
                           ...}
fi

```

Fig. 4.4. Algorisme de simulació de les operacions.

4.2.1.2. El simulador

El MOPP simula el llançament d'ordres de fabricació (OFP) de lots de productes finals. Les receptes obeeixen un assignació única d'equips a tasques i les dimensions de lot, per tant, vénen predefinides (només cal una sola comprovació inicial de la coherència de les capacitats). En acabar les tasques de cada OFP, s'ha d'actualitzar la producció acumulada fins al moment, tal i com resumeix l'algoritme de la figura 4.4 per a la simulació d'operacions d'una campanya .

La simulació de temps es realitza seqüencialment del passat cap el futur. Per cada ordre llançada se simulen de la primera a la última tasques involucrades. La disponibilitat dels equips es va actualitzant a mida que aquests s'utilitzen en cada tasca i es va construint el diagrama de Gantt. La simulació s'executa sota el principi d'iniciar i acabar les tasques tant aviat com la disponibilitat dels equips i la política d'espera finita (FW) ho permetin.

Tot i que per simplicitat no es mostra a la figura 4.4, el MOPP duu a terme la simulació d'operacions amb un gran nivell de detall. Les tasques de la recepta poden ser indiferentment discontinües o semicontínues i entre el temps d'inici i el temps de finalització de cada esdeveniment hi poden tenir lloc preparacions, neteges i transferències.

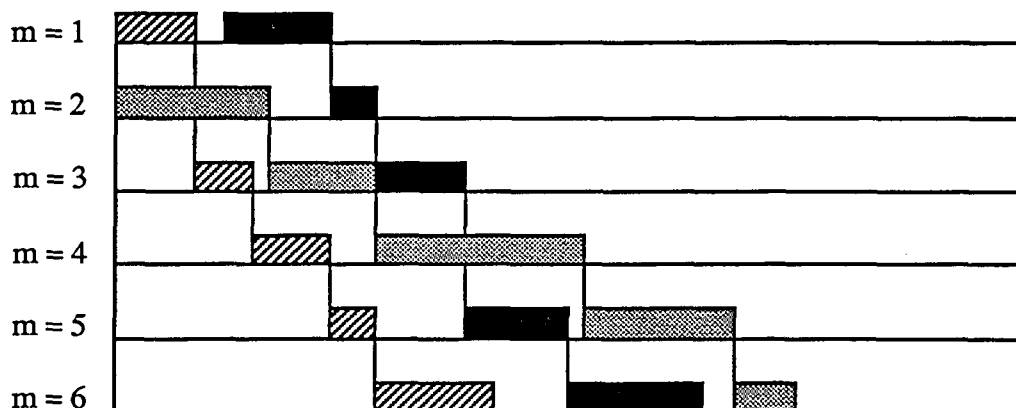


Fig. 4.5. Simulació no considerada.

D'acord amb el corresponent model del capítol 3, cal remarcar entre les limitacions d'aquest simulador multiproducte la impossibilitat de la situació de la figura 4.5, ja que no pot ser definida mitjançant una estratègia de llaçament d'OFPs. La figura 4.5 mostra, doncs, les mateixes operacions agrupades i llançades en OFPs i l'enumeració dels esdeveniments que en resulta. Aquesta limitació, però, esdevé un gran avantatge a l'hora de modificar els temps en els quals es donen els esdeveniments.

La independència de cada OFP llançada permet la simulació de retards puntuals (incidències o restriccions) a través de la modificació dels temps de disponibilitat dels equips (Fig. 4.7). Donat que el retard de qualsevol esdeveniment només retardarà els esdeveniments de les OFP que es llançaran amb posterioritat, no hi ha necessitat de canviar el programa d'operacions, el mateix algoritme de simulació continua essent vàlid.

A la figura 4.7 s'il·lustra la simulació d'un retard en l'inici de l'esdeveniment 4 mitjançant una ocupació fictícia de l'equip 5. Se suposa que l'intermedi generat en la tasca anterior és estable i pot admetre una espera. Altrament, caldria retardar el començament dels esdeveniments 1 i 2 però mai els de cap esdeveniment d'ordres llançades amb anterioritat. Les conseqüències per a les ordres posteriors són el retard de l'esdeveniment 10 i l'espera en el 9. En cas que no fos possible l'espera llavors caldria retardar els esdeveniments 8, 7 i 6 successivament, la qual cosa podria provocar, potser, retards en OFP3.

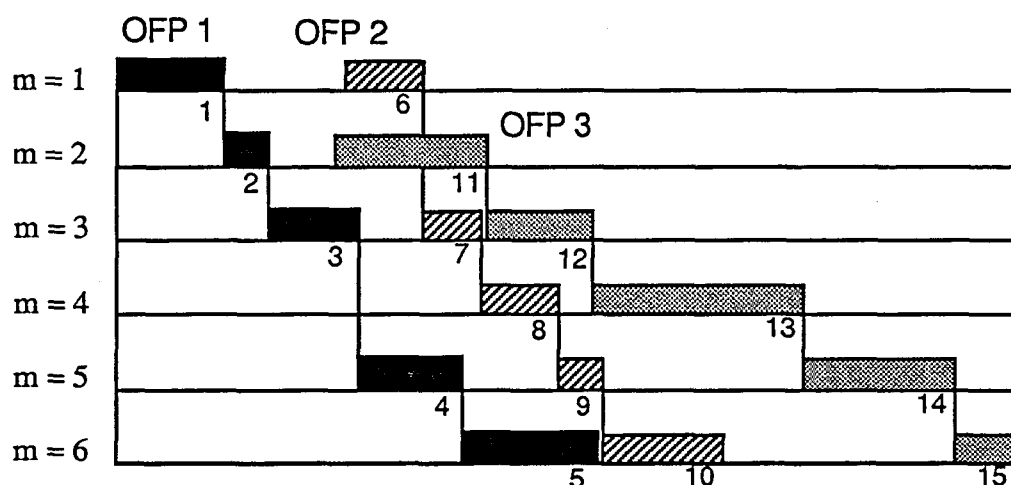


Fig. 4.6. Enumeració d'esdeveniments seguint el llançament d'OFP.

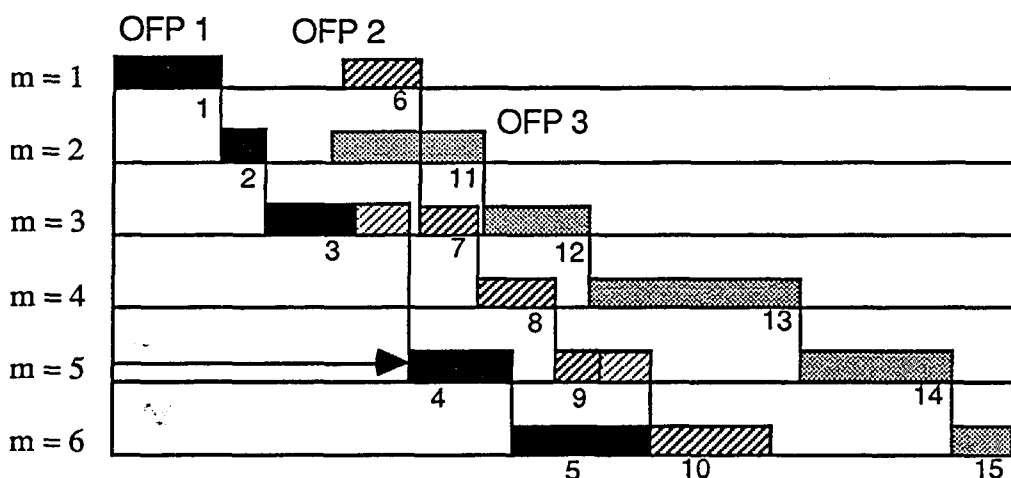


Fig. 4.7. Introducció d'un retard en el programa d'operacions.

4.2.1.3. Esquema de solució.

Les etapes principals de l'estratègia de planificació són els presentats a la figura 4.8 i segueixen les línies generals establertes en el treball de Mauderli i Rippin (1979). El primer pas consisteix en una anàlisi d'un conjunt de campanyes prefixat. La simulació permet l'avaluació de seva productivitat (B/T), la seva classificació i la identificació de les campanyes dominants.

A continuació la selecció de les millors campanyes, que es fa sota el control de l'usuari, en proporciona un conjunt reduït amb el qual emprendre la planificació. Finalment, aquestes campanyes són les que s'utilitzen per assignar una producció al conjunt de períodes a curt termini (que representen les parades de planta) i satisfer una demanda repartida desigualment en períodes a mig termini (que en descriuen l'estacionalitat).

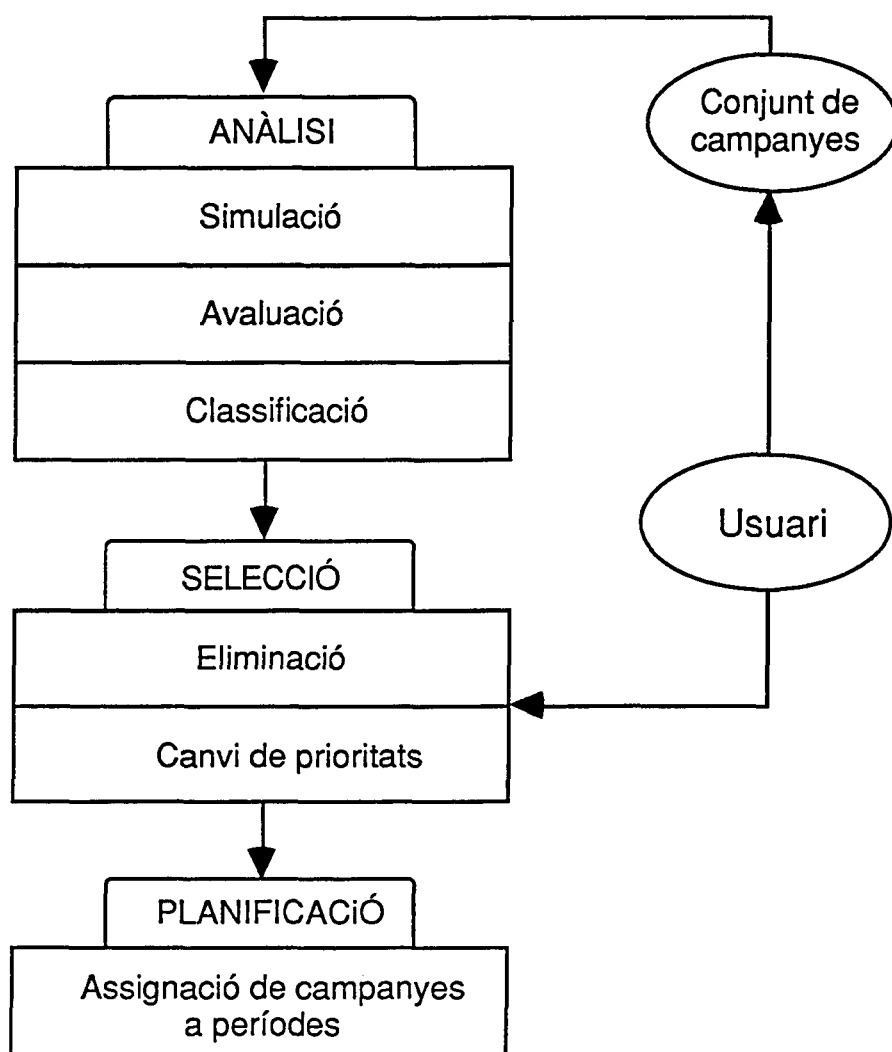


Fig. 4.8. Esquema general de funcions del MOPP.

4.2.1.4. Planificació

Les campanyes són les peces fonamentals de la planificació. Aquestes es defineixen per paràmetres generals (productivitat, temps de cicle, temps de canvi de campanya ...) i permeten evitar el detall de les operacions a l'hora de resoldre la planificació. Aquest problema es planteja com la cerca de la millor assignació de campanyes a períodes i la determinació dels intervals de temps que es dediquen a cada una d'elles per tal d'ajustar la producció a la demanda i minimitzar els costos de retard i d'estoc.

La planificació implica la resolució conjunta d'un problema de múltiples motxilles amb problemes de seqüenciació (TSP) associats. L'estratègia de solució implementada es basa en l'assignació iterativa de les millors campanyes compatibles amb la demanda, l'actualització de la producció després de cada assignació i la resseqüenciació de les ordres implicades pel conjunt de campanyes escollit. L'heurística la descriu Espuña en el seu treball de tesi (1994) i es troba formulada detalladament en un article de propera publicació (Grau et al., 1995).

La planificació de casos estrictament multiproducte es resol correctament i s'ha demostrat la seva utilitat com a eina d'orientació i validació per al disseny de planta (Graells et al., 1991). Les limitacions de la metodologia apareixen en el moment en el qual s'aborden problemes no estrictament multiproducte. En situacions amb receptes amb diferent número de tasques i fins i tot productes independents, malgrat que també es poden simular, la determinació dels temps de cicle i de canvi no tants sols no és fàcil sinó a voltes inexacta. En tant que llavors aquests darrers són conceptes poc definits, els resultats que d'ells se'n deriven no són totalment fiables.

4.2.1.5. El paper de l'usuari

Degut a l'absència d'alternatives en les receptes dels productes el sistema informàtic es capaç de plantejar i simular les diferents campanyes monoproducte, però la participació de l'usuari és necessària en la fase multiproducte. La manca d'estratègies per generar campanyes complexes combinant les simples fa recaure en l'usuari la decisió de proposar un conjunt adient de campanyes multiproducte per simular i analitzar. L'usuari, que disposa de la informació de les simulacions prèvies de les campanyes monoproducte, haurà de valorar la necessitat d'examinar el màxim número de possibilitats i el temps de càlcul del qual disposa.

La intervenció de l'usuari és inicialment essencial per a la determinació d'un conjunt limitat de campanyes per a la seva anàlisi i posterior selecció. La seva participació posterior no és imprescindible, però no tant sols és possible sinó que pot ser molt valuosa. La classificació de les campanyes analitzades i la selecció de les millors són proposades primerament pel programa, però és l'usuari qui les accepta o bé les esmena.

Finalment, l'assignació de campanyes a períodes l'executa automàticament el mateix programa i es deixa per a l'usuari la possibilitat de fer manualment les reassignacions que aquest cregui convenient. El simulador s'encarregarà de negar a l'usuari els canvis inviablès i l'informarà del resultat de les seves maniobres a través de les modificacions que provoquin en la funció objectiu. La filosofia del programa és de servir d'eina a l'usuari, que és qui ha de controlar tot el procediment d'execució.

4.2.1.6. Consum de serveis generals limitats

Un altre aspecte molt important és la possibilitat de descriure les necessitats de serveis generals (electricitat, vapor, mà d'obra,...). Aquestes necessitats determinaran els corresponents perfils temporals de demanda de serveis. Els perfils poden presentar màxims de consum que excedeixin els límits disponibles i que s'hagin d'eliminar mitjançant la reprogramació dels esdeveniments que els provoquen. L'enumeració cronològica dels consums del perfil és l'aspecte clau que permetrà la supressió d'aquests pics mitjançant heurístiques de retardament d'esdeveniments.

La revisió de les heurístiques ha estat part d'aquest treball. L'heurística que s'introdueix a continuació és la finalment adoptada i implementada en el programa degut al seu caire general que permet tractar indistintament tant el cas multiproducte com el multipropòsit. La seva presentació és a nivell de filosofia però una descripció més extensa i detallada es pot trobar a l'informe del projecte JOULE-II (Puigjaner et al., 1994).

Els conflictes en el consum de serveis limitats no es resolen simultàniament a la programació de les operacions sinó posteriorment i de forma iterativa. Inicialment, la programació d'operacions es fa simulant el llançament d'ordres de fabricació sota el principi de minimització dels temps d'espera. La figura 4.9 mostra la simulació i enumeració de vuit esdeveniments per la fabricació de dos lots de productes diferents. A continuació es disposen les demandes de servei i s'enumeren cronològicament les variacions de consum (positives i negatives). Finalment, el perfil de consum s'obté de la integració de totes les variacions.

A l'exemple de la figura 4.9 l'esdeveniment número quatre s'identifica immediatament com el responsable de la primera demanda de servei superior a la disponible. De fet, es tracta concretament de la variació de consum número vuit (8). És, doncs, a partir d'ella que es comença la cerca iterativa d'una variació de consum posterior tal que:

- Signi negativa. Ha de ser una baixada de consum (9).
- Que la corresponent demanda de servei s'hagi iniciat (7) amb anterioritat al conflicte (8).
- Correspongui a una ordre de fabricació diferent.

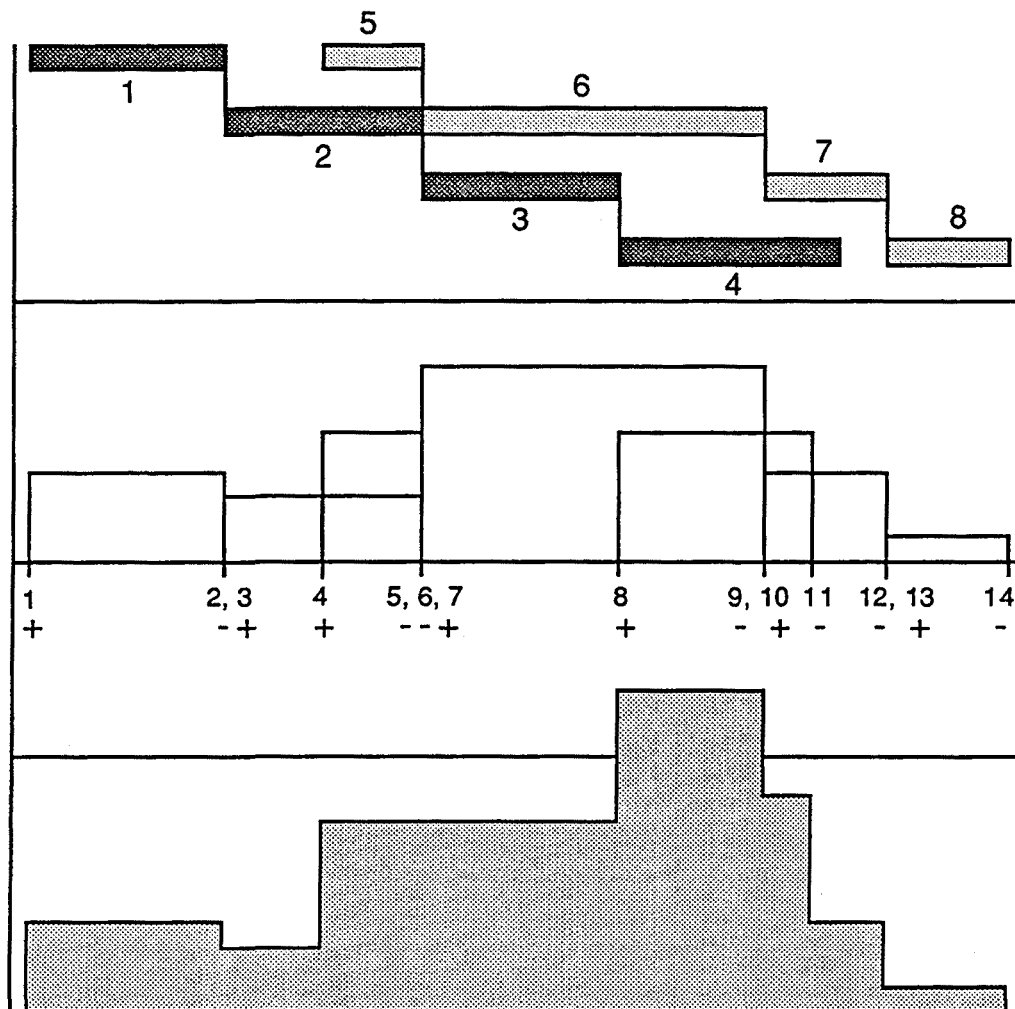


Fig. 4.9. Violació de les restriccions de serveis.

D'aquesta manera queda identificat l'esdeveniment número sis com a responsable del problema. Llavors, vista la impossibilitat que les dues demandes de servei coincideixin en el temps, serà necessari el retard d'una respecte l'altra per tal de desacoblar-les.

La figura 4.10 mostra les dues opcions amb menors conseqüències. El retard ΔT_1 és el mínim aplicable a l'esdeveniment 4 si el 6 es manté al seu lloc. A l'inrevés, ΔT_2 és el mínim

necessari per apartar el 6 sense moure el 4. Tenint en compte el lligam entre tots els esdeveniments d'una mateixa ordre, la regla de decisió que s'aplica en aquest punt és retardar sempre les ordres i els esdeveniments llançats en darrer lloc. Contràriament, l'altra opció pot desencadenar un seguit imprevisible de retards d'efectes contraris als desitjats.

La figura 4.11 mostra el programa d'operacions que resulta d'aplicar el retard ΔT_2 a l'esdeveniment número sis. Aquest arrossega l'esdeveniment anterior (5) degut a la inestabilitat de l'intermedi (ZW) i retarda l'inici dels següents (7 i 8). D'acord amb l'objectiu que es pretenia, el perfil de demanda que es deriva d'aquest nou diagrama de Gantt no presenta cap ultrapassament del màxim disponible.

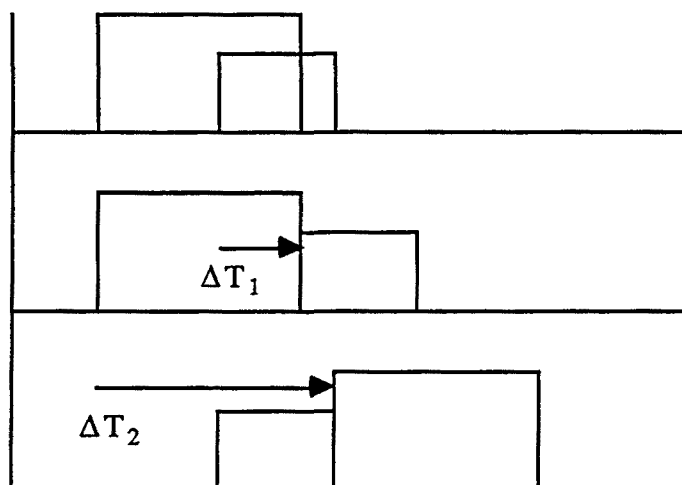


Fig. 4.10. Possibles retards relatius dels dos consums en conflicte.

En exemples més complexos, però, encara podrien quedar, o podrien haver aparegut arran dels retards introduïts, incompliments posteriors de les restriccions de serveis. En aquest cas, caldria repetir iterativament el procés exposat i la introducció i simulació d'un nou retard. Procedint cronològicament d'esquerra a dreta, el perfil s'anirà escapçant fins haver satisfet les restriccions a costa d'una major inversió en temps (*makespan*).

Els resultats obtinguts de l'aplicació d'aquesta estratègia són prou satisfactoris. Si bé no es pot garantir que el retard total que provoca sigui el mínim possible, sí que aquest és del tot acceptable. Tant és així que, fins i tot per casos de perfils complexos com el de les figures A2 i A3, s'obtenen solucions en les quals els retards i esperes introduïts no alteren el temps de finalització del darrer esdeveniment. L'exemple correspon a la ocupació de la mà d'obra en un procés de la indústria del cuir (Graells et al., 1992).

La simplicitat i la rapidesa d'una tècnica d'aquest tipus rau en el fet que és possible obtenir una solució retardant esdeveniments i que, per tant, no hi ha cap necessitat de canviar la seqüència d'esdeveniments ni l'assignació d'equips (Figs. 4.13a i 4.13b). Els retards

introduïts no afecten els lligams (transferències) entre les tasques successives d'una mateixa ordre i , evidentment, les ordres de fabricació són independents en aquest aspecte. La regla de retardar l'últim esdeveniment simulat evita provocar aquest tipus de conflicte. Però, és precisament l'ordre en el qual aquests han estat simulats i que evita els creuaments de les ordres de fabricació, el que dóna sentit a aquesta regla.

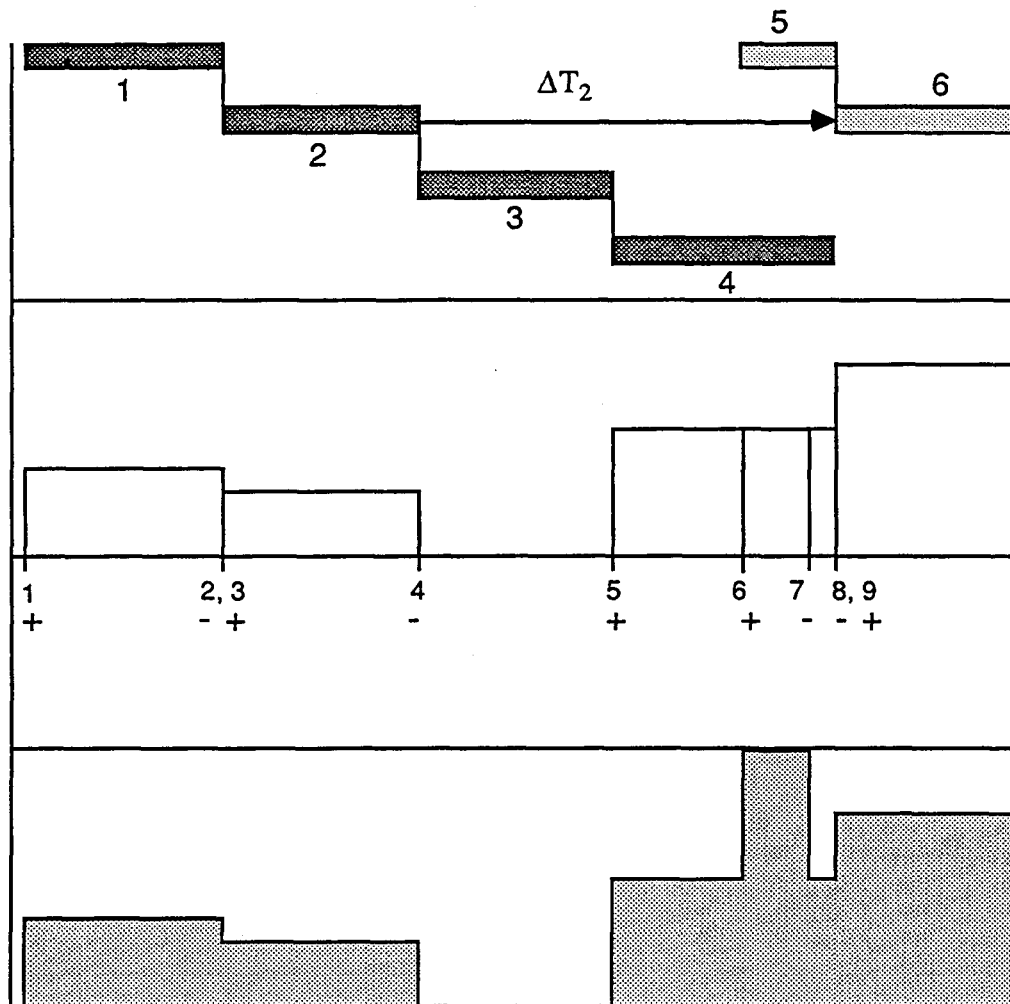


Fig. 4.11. Aplicació d'un retard per evitar el pic de consum.

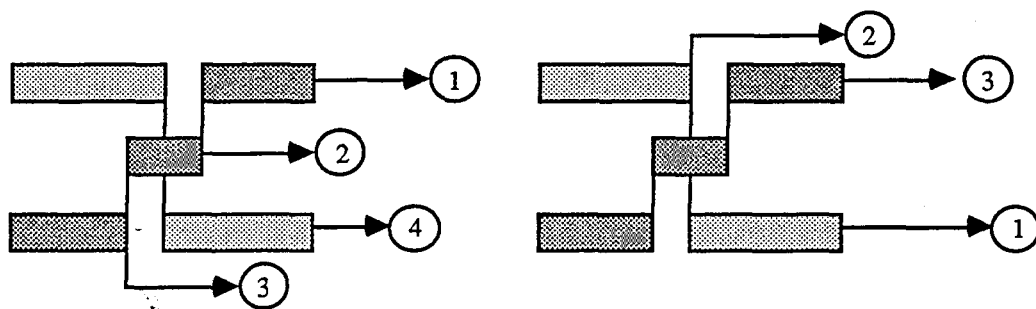


Fig. 4.13a. Cascada de retards provocats per la impossibilitat d'espera (ZW) com a conseqüència dels retards inicials.

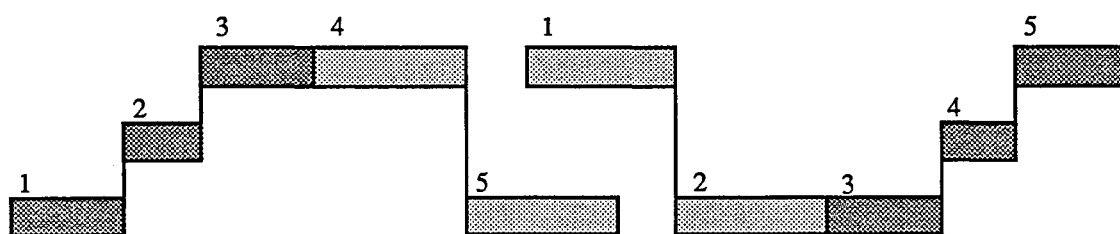


Fig. 4.13b. Les úniques opcions per no fer coincidir en el temps les últimes tasques de cada lot és alterant la seqüència d'esdeveniments.

4.2.2. Ampliació multipropòsit

A continuació s'exposa el treball de reformulació i remodelació del programa per al cas multipropòsit. Primer fent referència al canvi conceptual necessari. En segon lloc, detallant l'ampliació del simulador realitzada per tal de descriure acuradament l'emmagatzemament intermig i les possibilitats d'utilització d'equips alternatius operant en fase i fora de fase. Finalment, es presentaran les noves estratègies ideades tant per a la descripció i identificació de les diferents possibilitats de producció com per a la modificació i optimització dels programes d'operacions.

4.2.2.1. Nivells de detall. Ordres de fabricació d'intermedis: OFI

És evident que la comprensió del problema multipropòsit no es pot basar exclusivament en la senzillesa conceptual del cas multiproducte. La combinatòria del problema exigeix una nova organització d'idees capaç de gestionar la informació necessària per descriure les diferents assignacions de recursos a les activitats que es programen. Una adequada classificació dels tipus d'activitats permetrà agrupar aquestes assignacions i compactar la corresponent informació a diferents nivells. Els punts més determinants el replantejament del problema han estat:

- La senzillesa de simulació del llançament d'OPF que, si bé no permet l'entrellaçament de rutes de producció (Fig. 4.5), té l'avantatge que permet la introducció de retards (incidències, restriccions en el consum de serveis, etc...) sense canviar les assignacions.

- La necessitat del cas multipropòsit de descriure correctament aquests entrelaçaments, tot i que només resulten profitosos en punts concrets i en els quals l'estabilitat dels intermedis involucrats en garanteixi la viabilitat pràctica en cas de retards o incidències.
- La importància dels intermedis estables i el seu emmagatzematge tant per ajustar les capacitats dels diferents subtrens de producció com per la seguretat d'operació davant retards i incidències.

Dels dos primers punts es desprèn que caldria escollir una nova activitat com a unitat fonamental per al llançament d'ordres. Llavors, la consideració del tercer punt porta inevitablement a la introducció de dos conceptes fonamentals d'aquest treball de tesi, les ordres de fabricació d'intermedis estables (OFI) i els minilots d'intermedis estables que en resulten.

Es tracta d'una opció de compromís entre la possibilitat de llançament d'ordres per a tasques individuals (regles clàssiques de *dispatching*) i la de llançament d'ordres per a l'obtenció de lots de productes acabats (OFP). D'aquesta manera se salven els problemes d'emmagatzemament (Fig.2.4) que comporta la primera i la poca flexibilitat que permet la segona. D'altra banda constitueix un apropament a la realitat industrial en el sentit que se situa entre dos models ideals i extrems (multiproducte i multipropòsit, *flowshop* i *jobshop*) segons el número de dipòsits d'emmagatzemament (reals o virtuals) que es vulgui considerar.

Taula 4.17. Nivells de detall del simulador multipropòsit.

Accions	Assignació	Resultat	Producció
Campanya	Llista de rutes	Conjunt de lots	Productes finals
Ordre	Mini-rutes	Un minilot	Intermedi estable
Tasca	Grups d'equips	Un minilot	Intermedi
Esdeveniment	Equips	Una càrrega	Intermedi

Tal i com mostra la taula 4.17, cada acció va acompanyada de la informació de què cal fer i com i on cal fer-ho. En l'enfoc multipropòsit que es proposa, una campanya ve definida per la repetició d'un conjunt ordenat de rutes iguals o diferents assignades a productes iguals o diferents. Cada una d'aquestes rutes ve determinada per un conjunt ordenat de minirutes que donen lloc als corresponents intermedis a mida que s'executen les ordres de fabricació d'intermedis estables (OFI) que es van llançant (simulant).

Les minirutes van lligades a parts de les receptes. Es tracta de conjunts ordenats de tasques consecutives que converteixen un intermedi estable en el següent. Cada una d'aquestes tasques, segons la miniruta, té assignat un equip o un grup d'equips on s'han de dur a terme. Els esdeveniments que es representen al diagrama de Gantt corresponen a la utilització de cada un d'aquests equips al contribuir, amb la càrrega corresponent, a processar tot el minilot.

4.2.2.2. Simulació d'equips alternatius

La possibilitat d'un conjunt d'equips alternatius adequats per executar una mateixa tasca existeix tant per a les tasques discontinúes com per a les semicontínues. Es així, doncs, que resulta necessari descriure la utilització en ocasions d'un equip, en ocasions d'un altre (operació fora de fase) o bé simultàniament d'un grup d'ells (operació en fase). El tractament, però, no serà el mateix per a les tasques discontinúes que per a les semicontínues.

La tria d'una o una altra unitat semicontínua pot representar un major o menor cabal de transferència. L'operació simultània d'un grup d'aquests equips sempre resultarà en un augment del cabal total que serà igual a la suma dels individuals. Així, la tria de més o millors equips afectarà inversament el temps de càrrega i descàrrega dels equips discontinus i pot acabar incidint sobre el temps de cicle.

Les variacions poden ser més o menys significatives fins el punt d'arribar a ser essencials en casos amb etapes semicontínues limitants (p.e. filtració). En aquest treball, però, s'han considerat improbables i no es discutiran les possibilitats de selecció i utilització d'equips semicontínus en fase. Així i tot, l'efecte sobre el temps es podrà avaluar després de la simulació de cada cas particular. El fet important, precisament, és que la simulació de qualsevol possibilitat és viable perquè no està subjecta a cap tipus de restriccions de capacitat.

Ben al contrari, la simulació d'etapes discontinúes sí està subjecta a restriccions de capacitat. Malgrat que la dependència del temps d'operació de la càrrega processada i de l'equip també pot afectar els temps de cicle, l'elecció d'uns equips o d'uns altres ve primerament determinada per llurs capacitats. La simulació ha de comprovar el compliment de les restriccions de capacitat i aquestes han de ser tingudes en compte en el procés de generació de les possibles rutes de producció. És per aquest motiu, que d'aquí en endavant es farà referència només les tasques discontinúes i a la seva problemàtica, llevat que es faci especial esment de les semicontínues.

Per totes les tasques de l'ordre n que se simula, la informació que cal fer arribar al simulador és, a més de les dades de la recepta, la tasca discontinua a realitzar ($ijnz$), el conjunt d'equips assignats (X_{ijkmnz} o per defecte tots els possibles) i la quantitat a processar (MB_{inz}). Evidentment s'ha de complir la restricció de capacitat 4.32:

$$MB_{inz} = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} X_{ijkmnz} \eta_{km} \frac{V_m}{S_{ijm}} \quad \forall \text{ } inz, j \in J_{iz} \quad (4.32)$$

El simulador, seguint l'ordre de prioritats establerts a la recepta, va acceptant els equips assignats fins que la capacitat nominal del conjunt es suficient per processar la quantitat exigida (MB_{inz}). A continuació s'assigna a cada un dels equips acceptats el mateix factor d'ocupació η^* segons les expressions següents:

$$MB_{inz} = \eta_{ijnz}^* \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} X_{ijkmnz} \frac{V_m}{S_{ijm}} \quad \forall \text{ } inz, j \in J_{iz} \quad (4.33)$$

$$\eta_{ijnz}^* = \frac{MB_{inz}}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} X_{ijkmnz} \frac{V_m}{S_{ijm}}} \quad \forall \text{ } inz, j \in J_{iz} \quad (4.34)$$

$$0 \leq \eta_{ijnz}^* \leq 1 \quad \forall \text{ } inz, j \in J_{iz} \quad (4.35)$$

En principi, aquest repartiment de la càrrega ha de ser possible si la informació enviada al simulador és correcta. En cas contrari, el simulador donarà el corresponent missatge d'error.

Cada un dels equips escollits per treballar en fase pot tenir un temps d'operació diferent depenent de la càrrega processada i tipus de l'equip. També és tasca del simulador introduir temps d'espera en els esdeveniment que acaben massa aviat per ajustar la descàrrega simultània de tots els equips tal i com estableix el model. És per això que la simulació comprovarà les restriccions d'estabilitat dels intermedis i contestarà amb el corresponent missatge d'error si aquestes no es poden complir.

4.2.2.3. Simulació de dipòsits

Conseqüentment amb el tractament de l'operació dels equips discontinus i semicontinus, l'operació dels equips d'emmagatzemament també ha estat modelitzada detalladament. Els

dipòsits se simulen com equips discontinus on són possibles subtasques de preparació, ompliment, operació, buidat i neteja (Fig. 4.14). Els diferents esdeveniments que s'enumeren durant la utilització del dipòsit són els relacionats amb els ompliments (per als quals el temps de buidat s'anul·la) i els buidaments (per als quals s'anul·len els d'ompliment).

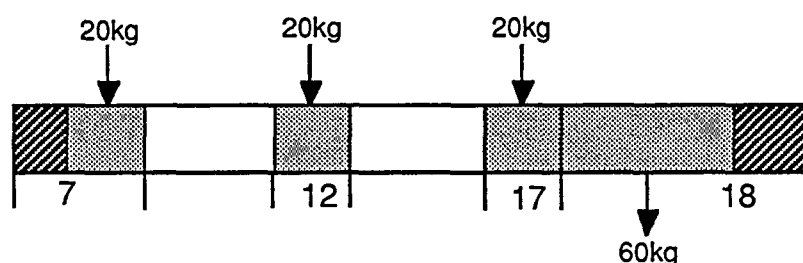


Fig. 4.14. Operació d'un dipòsit en 4 esdeveniments. La primera càrrega va associada a una preparació i la descàrrega a una neteja.

Els temps de preparació i neteja també s'anul·len mentre el nivell del dipòsit és manté diferent de zero i prenen els valors especificats per les penalitzacions per canvi de producte a l'inici i final de la utilització del dipòsit (Fig. 4.14). El temps d'operació és una dada que ha estat fixada a zero en tots els casos que es presenten per tal de simular un simple tanc d'emmagatzematge.

Tot i així, el simulador pot admetre temps d'operació positius i descriure reactors que admetin un seguit de càrregues abans de processar el conjunt o que lliurin la càrrega produïda en diferents minilots (Fig. 4.15). Malgrat que la consideració d'una metodologia general per aquest cas de política NIS forma part de les limitacions d'aquest treball, la simulació i solució de casos particulars ha resultat molt fàcil (Projecte CIM-FOOD, Puigjaner et al. 1994).

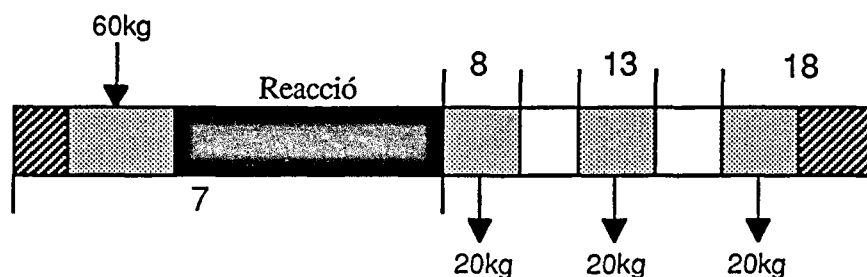


Fig. 4.15. Operació d'un reactor en 4 esdeveniments. La càrrega resultant es processa en 3 minilots.

```

Per repetició = 1 → NÚMERO_REPETICIONS(campanya)
  ruta = RUTA(campanya)

  Per ordre = 1 → NÚMERO_ORDRES(ruta)
    mini_ruta = MINI_RUTA(ruta,ordre)

    producte = PRODUCTE(mini_ruta)
    mini_lot = MINI_LOT(mini_ruta)
    tasca_in = TASCA_INICI(mini_ruta)
    tasca_fi = TASCA_FINAL(mini_ruta)

    correcció = FACTOR_AJUST(ruta,ordre)
    mini_lot = mini_lot * correcció

    Per tasca = tasca_in → tasca_fi
      número_total = EQUIPS_EN_FASE(ruta,tasca)
      utilització = FACTOR_OCUPACIÓ(ruta,tasca)

      Per número = 1 → número_total
        equip = EQUIP(mini_ruta,tasca,número)
        esdeveniment = esdeveniment + 1
        Simulació temps
        { TEMPS_INICI(esdeveniment ) =
          f(producte,tasca,equip,utilització),
          TEMPS_FINAL(esdeveniment ) =
            f(producte,tasca,equip,utilització),
            ...}

        DISPONIBILITAT(equip) =
          TEMPS_FINAL(esdeveniment)
      fi
    fi

    Simulació producció
    { NIVELL(dipòsit,producte) =
      NIVELL(dipòsit,producte) + mini_lot,
      PRODUCCIÓ(producte) =
        NIVELL(dipòsit_final,producte), ...}
  fi
fi
fi

```

Fig. 4.16. Algorisme de simulació multipropòsit.